

3.3 Urbanisation influence on temperature trends

Page 21

MISLEADING

The influence of UHI warming is logarithmic in population, in other words it is strongest at low population density then levels off as local urbanisation expands (Oke (1973) and Spencer et al. (2025)). Hence failure to find a difference in warming rates between urban and rural stations does not prove the absence of UHI contamination.

[[HYPERLINK "https://berkeleyearth.org/team/"](https://berkeleyearth.org/team/) \l "zeke-hausfather" \h], research scientist, Berkeley Earth

This is both overly simplified – the actual environment immediately around the station matters a lot more than regional population density – and not particularly reflective of the literature. Some studies using pretty strict cutoffs for urbanity (e.g. Hausfather et al. (2013)) still find minimal differences in urban and rural stations.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018509"](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018509) \h]

3.3 Urbanisation influence on temperature trends

Page 21

FALSE

In summary, while there is clearly warming in the land record, there is also evidence that it is biased upward by patterns of urbanisation and that these biases have not been completely removed by the data processing algorithms used to produce climate data sets.

[[HYPERLINK "https://berkeleyearth.org/team/"](https://berkeleyearth.org/team/) \l "zeke-hausfather" \h],
research scientist, Berkeley Earth

The authors of the DoE report make a strong claim based on papers by some of their team (McKittrick and Spencer) while ignoring other studies that point otherwise. There is by no means agreement that there is a meaningful unremoved UHI bias in land temperatures in the surface record. Indeed, Spencer et al. (2025) only examines raw temperature records and gets a result comparable to that found by Hausfather et al. (2013), but does not do the follow up analysis of homogenised temperature records to see if the UHI bias has been effectively detected and removed (as Hausfather et al. (2013) find that it was). The analysis in this section also ignores independent assessments by AIRS satellites (global; Susskind et al. (2019)) and the US Climate Reference Network (US; Hausfather et al. (2016)) that show the same rate of warming as the full land station network during the period of overlap, suggesting minimal UHI biases in recent decades. Finally, this section on UHI never bothers to point out that the world is mostly oceans, so even a significant (>10%) bias in land temperatures, if it existed, would have a much smaller effect on resulting global surface temperatures.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE

RLIN

K

"https

://agu

pubs.

online

librar

y.wile

y.com

/doi/f

ull/10.

1029/

2012J

D018

509"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://iops

cience

.iop.o

rg/art

icle/1

0.1088

/1748-

9326/

aafd4

e" \h

]

Part II: Climate response to CO2 emissions

4.2 Model-based estimates of climate sensitivity

Page 27

FALSE

AR6 (2021) did not rely on climate model simulations in their assessment of climate sensitivity, relying instead on data-driven methods.

Anonymous

AR6 used multiple lines of evidence in the assessment of climate sensitivity: Understanding of climate processes, the instrumental record, palaeoclimates and model-based emergent constraints. Indeed, the authors of the DoE report contradict their own claim four paragraphs later by saying: "For AR6, the IPCC placed primary weight on the results of Sherwood et al. (2020) that combined historical data and palaeoclimate proxies with the process-based approach." Sherwood et al (2020) used climate models as one of their lines of evidence.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/"](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/) \h]

4.3 Data-driven estimates of climate sensitivity

Page 28

MISLEADING

Most climate models simulate that rising GHGs will weaken the west-east temperature gradient, which led the IPCC in AR6 to conclude that data-driven ECS estimates understated the future ECS value. However, Seager et al. (2019) pointed out that, contrary to models, the west-east temperature gradient has been strengthening over time. They further argued that the mechanism predicting otherwise in climate models was based on a faulty characterisation of oceanic dynamics and there is no reason to expect the gradient to weaken. A similar argument was recently made by Lee et al. (2024), who concluded that “the trajectory of the observed trend reflects the response to increasing GHG loading in the atmosphere”; in other words, GHG warming should lead to a future strengthening rather than a weakening of the temperature gradient. Increased efficiency of atmospheric cooling implies, if anything, that the future ECS in a warming climate might be lower than current estimates.

[[HYPERLINK "https://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/people/seager/" \h](https://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/people/seager/)],
Ewing Lamont research professor, Columbia University

The report is right to point out that we have drawn attention to the fact that the observed gradient has been strengthening while models robustly predict a weakening in response to rising GHGs. The report is also right that we suggested models get the response wrong due to biases in how they simulate the tropical Pacific Ocean...But inferences on the relation between SST, radiation and climate sensitivity for the short time period (strongly influenced by natural internal variability) are not readily transferable to understand these relations for the forced response in the gradient. I don't think we know what

the implications for climate sensitivity are of the problem models have in reproducing the observed pattern of tropical Pacific SST change.

Quote given to Carbon Brief

4.3 Data-driven estimates of climate sensitivity

Page 28

MISLEADING

An argument emphasised in AR6 is that data-driven ECS estimates might understate the future warming response to GHGs because of a so-called “pattern effect” (Forster et al. (2021)). The tropical Pacific is believed to strongly influence the overall efficiency with which the Earth radiates heat to space, but some regions remove heat more efficiently than others. If the west-to-east temperature gradient in the tropical Pacific is weakened in a warming climate, warming would concentrate where heat is less efficiently removed, raising ECS.

[[HYPERLINK "https://environment.leeds.ac.uk/see/staff/1267/professor-piers-forster"](https://environment.leeds.ac.uk/see/staff/1267/professor-piers-forster) \h], professor of climate physics, University of Leeds

The citation is ok, but rather offhand and dismissive, given the large amount of evidence assessed on the pattern effect in the IPCC report – it’s my chapter 7 which is cited. I also find that the literature on the pattern effect which the section...goes on to discuss is skewed and biased towards suggesting a small GHG cooling. It is especially missing a lot of other literature with conflicting evidence. Lots of literature that we cite in the IPCC report and evidence published since – including my own work – suggests a real pattern effect and

high climate sensitivity. If you are going to present conflicting arguments to my IPCC chapter produced by many international authors and three rounds of peer review, including multiple government reviews, I think you would need to explain where these other studies we referenced in IPCC go wrong. I therefore find their argument weak.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/" \h](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/)]

4.3 Data-driven estimates of climate sensitivity

Page 28

MISLEADING

A similar argument was recently made by Lee et al. (2024), who concluded that “the trajectory of the observed trend reflects the response to increasing GHG loading in the atmosphere”; in other words, GHG warming should lead to a future strengthening rather than a weakening of the temperature gradient. Increased efficiency of atmospheric cooling implies, if anything, that the future ECS in a warming climate might be lower than current estimates.

[[HYPERLINK "https://www.ems.psu.edu/directory/sukyoung-lee" \h](https://www.ems.psu.edu/directory/sukyoung-lee)], distinguished professor of meteorology

The report cited my article out of context. Current climate models predict tropical Pacific sea surface temperature (SST) gradients that do not align with observational trends, whereas the simple model used in my study does. This does not mean that the climate models have no value for predicting the effects

of human activities on future climates. My study simply identified one specific aspect where models may need to be improved to make the predictions more accurate.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06741-7"](https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06741-7) \h]

5.5 Stratospheric cooling

Page 38

MISLEADING

An important element of the expected general “fingerprint” of anthropogenic climate change is simultaneous warming of the troposphere and cooling of the stratosphere. The latter feature is also influenced by ozone depletion and recovery. AR6 acknowledged that cooling had been observed but only until the year 2000. The stratosphere has shown some warming since, contrary to model projections.

[[HYPERLINK "https://diagrammonkey.wordpress.com/about/"](https://diagrammonkey.wordpress.com/about/) \h], climate scientist

“The poverty of their viewpoint is exemplified in the section on ‘stratospheric cooling’ about one-third of which consists of a long quote from the IPCC AR6 WG1 chapter 2, enough to cite a description of how stratospheric temperatures have changed, but completely ignoring the section on the causes which can be found in section 3.3.1.2.2 of the IPCC WG1 report...They can’t even be bothered to finish the one additional quote that takes up much of the rest of the section,

the one from Philipona et al. (2018). The quote, which is from the abstract is cut short with a full stop, where the abstract goes on, after a comma, to say: 'which is consistent with a reversal from ozone depletion to recovery from the effects of ozone-depleting substances.' In other words, it's not that simple and the report relies for its effect on you not digging any further, not even the tiniest little bit."

Quote from [[HYPERLINK "https://diagrammonkey.wordpress.com/2025/08/01/nothing-every-changes-except-the-climate/"](https://diagrammonkey.wordpress.com/2025/08/01/nothing-every-changes-except-the-climate/) \h]

Supporting evidence

[

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.ipc

c.ch/r

eport/

ar6/w

g1/ch

apter/

chapt

er-2/"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.ipc

c.ch/r

eport/

ar6/w

g1/ch

apter/

chapt

er-3/"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://agu

pubs.

onlin

elibra

ry.wil

ey.co

m/doi

/10.10

29/20

18JD0

28901

" \h]

5.5 Stratospheric cooling

Page 39

MISLEADING

A combination of tropospheric warming and stratospheric cooling is a commonly cited “fingerprint” of anthropogenic climate change. Stratospheric warming since 2000 coincides with continued surface and tropospheric warming, a pattern that is not found in climate model simulations and is not apparently consistent with the anthropogenic fingerprint.

[[HYPERLINK "https://pcmdi.llnl.gov/staff/santer/" \h \]](https://pcmdi.llnl.gov/staff/santer/), atmospheric scientist, Lawrence Livermore National Laboratory

The DoE claim is not true. Climate models can and do show recovery of lower stratospheric temperature after 2000 in response to ozone recovery (and in

accord with satellite observations). Over the full satellite era (1986 to 2024), models show very large cooling of the mid- to upper stratosphere in response to human-caused changes in CO₂ and ozone (see Fig. 1 in the appended paper). The observed vertical structure of atmospheric temperature change IS consistent with model predictions and with basic theory. The DoE report cites the appended 2023 Santer et al. PNAS paper as "evidence of absence" of a human fingerprint on the vertical structure of atmospheric temperature. Our 2023 paper actually provides strong evidence FOR the positive identification of this human fingerprint in satellite data.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2300758120"](https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2300758120) \h]

5.8 US corn belt

Page 42

FALSE

One of the largest discrepancies between models and observations is in the US corn belt, a region of particular importance to global food production. Figure 5.9 shows the warming trends for summertime (June, July, August) for the 12-state corn belt (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) during 1973-2022. All 36 climate models (red) warm far too rapidly compared to observations (blue).

[[HYPERLINK "https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/"](https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/) \h], lead author, IPCC AR6 WG2

There is no source for this and no methodological description. I don't believe the comparison between models and observation is correct.

Quote given to Carbon Brief

5.8 US corn belt

Page 43

MISLEADING

As discussed in Chapter 9, the anticipated negative effects of increasing temperatures on US corn yields have not materialised, in contrast to widely publicised studies proclaiming that theoretical future impacts are already being experienced (e.g., Seager et al. (2018))

[[HYPERLINK "https://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/people/seager/" \h](https://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/people/seager/)],
Ewing Lamont research professor, Columbia University

Our 2018 paper referred to changes in aridity and implications for what crops are grown and farm size and was not about corn yields. We suggest that changes patterns and values of precipitation and potential evapotranspiration would increase aridity over most of the US, which would, in the absence of adaptation, restrict corn cultivation to regions further east. But neither part of the two-part paper claims yields are reducing already due to climate change.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://journals.ametsoc.org/view/journals/eint/22/5/ei-d-17-0012.1.xml" \h](https://journals.ametsoc.org/view/journals/eint/22/5/ei-d-17-0012.1.xml)]

6 Extreme weather

Pages 57-82

MISLEADING

Section 6

[[HYPERLINK "https://emanuel.mit.edu/" \h](https://emanuel.mit.edu/)], professor emeritus of atmospheric science, Massachusetts Institute of Technology

The authors begin sensibly, in the introduction, stating that: ‘Climate is about the statistical properties of weather over decades, not single events. Further, there are only about 130 years of reliable observational records that can be analysed statistically. That brief interval does not begin to contain all the extreme events that the climate system can create on its own.’ It is odd, then, that they proceed to present timeseries of even shorter length and claim not to find trends of extreme events in them, thereby leading the reader to conclude that there are no underlying trends. They should have just stuck with their original statement and made the correct conclusion that observations usually do not suffice to detect extreme event trends of the predicted magnitude, and then turned to an exposition of what theory and models have to say.

It is very odd that there is almost no mention of theory and models [for] extreme events... Global climate data clearly and unequivocally show this bound increasing in virtually all of the tropical cyclone genesis regions. And, contrary to the statement in the DoE report, an upward trend in the proportion of very strong hurricanes HAS been detected and published. But instead of citing any of this, these authors violate their own introductory statement by citing short

and generally unreliable records. For example, they state correctly that there is no detectable trend in continental US hurricane landfalls. But at an average of three landfalling storms per year, there are not nearly enough data to detect a trend of the predicted magnitude. Given that the Caribbean region had a high population density (and associated newspaper accounts) going back to the early 19th century, they could have looked at ALL Atlantic landfalls, not just the US. Had they done so, they would have discovered a clear upward trend.

Quote from [[HYPERLINK "https://science.feedback.org/review/misleading-u-s-department-energy-climate-report-chooses-bias-over-science-climate-scientists-say/"](https://science.feedback.org/review/misleading-u-s-department-energy-climate-report-chooses-bias-over-science-climate-scientists-say/) \h]

6 Extreme weather

Pages 57-82

MISLEADING

Section 6

[[HYPERLINK "https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=54778"](https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=54778) \h], head of Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich

The text of chapter 6 often cites chapter 11 of the IPCC AR6, but is a clear example of cherry-picking. The authors repeatedly highlight low-confidence statements from the IPCC AR6 chapter 11 on changes in climate extremes which are mostly on side topics of little relevance, but they rarely cite any high confidence statements from that chapter.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/"](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/) \h]
<https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html>

6 Extreme weather

Page 46

MISLEADING

Most types of extreme weather exhibit no statistically significant long-term trends over the available historical record.

[[HYPERLINK "https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=54778"](https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=54778) \h], head of Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich

Importantly, there is no evidence substantiating the claim of the authors of this DOE "critical review" that "most types of extreme weather exhibit no statistically significant long-term trends over the available historical record". It is not clear which types of "extreme weather" the authors refer to, which region(s) they are referring to, and what is the demonstration underlying the claim that "most" of these types exhibit no statistically significant long-term trends. I would ask the authors to provide the arguments substantiating this claim, as there is no rationale provided for this statement in the chapter.

I would also highlight the following conclusions from the IPCC AR6 chapter 11 which provide a very different collective assessment:

- "It is an established fact that human-induced greenhouse gas emissions have led to an increased frequency and/or intensity of some weather and climate extremes since pre-industrial time, in particular for temperature extremes."
- "Human-induced greenhouse gas forcing is the main driver of the observed changes in hot and cold extremes on the global scale (virtually certain)."

- "The frequency and intensity of heavy precipitation events have likely increased at the global scale over a majority of land regions with good observational coverage. Heavy precipitation has likely increased on the continental scale over three continents: North America, Europe, and Asia."
- "More regions are affected by increases in agricultural and ecological droughts with increasing global warming (high confidence)."
- "It is likely that the global proportion of Category 3–5 tropical cyclone instances has increased over the past four decades."

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/" \h](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/)]

6.2 Temperature extremes

Pages 63-71

MISLEADING

Section 6.3

[[HYPERLINK](https://usys.ethz.ch/en/people/profile.MTE5NTkw.TG1zdC82MzcsMzIwMTk3MjIy.html)

"<https://usys.ethz.ch/en/people/profile.MTE5NTkw.TG1zdC82MzcsMzIwMTk3MjIy.html>" \h], lecturer at the department of environmental systems science, ETH Zurich

The section on hot extremes is an extreme example of cherry-picking results. The report fails to acknowledge that the highlighted regions are some of the very few regions globally where the annual maximum temperatures have not

increased (see e.g. IPCC AR6 WG1 Fig. SPM3). The report further highlights that in some regions the number of hottest days have not increased, yet omits that

the hottest nights have increased over the same regions and periods (see figure 2.7 in the fifth US National Climate Assessment). Furthermore, the temperature of the warmest nights shows a positive trend over recent decades (Singh et al. 2023). The report further fails to refer to the extensive literature discussing the role of land-use changes and irrigation (Mueller et al. (2016)), aerosol forcing (Mascioli et al. (2017)) and unforced internal variability (Singh et al. (2023)) to the regions with little trends.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
 HYPE
 RLIN
 K
 "https
 ://ww
 w.ipc
 c.ch/r
 eport/
 ar6/w
 g1/fig
 ures/s
 umm
 ary-
 for-
 policy
 make
 rs/fig
 ure-
 spm-
 3" \h
] []
 HYPE
 RLIN
 K
 "https
 ://tool
 kit.cli
 mate.

gov/si
tes/de
fault/f
iles/2
025-
07/N
CA5_
2023_
FullR
eport.
pdf"

\h] [
HYPE
RLIN
K

"https
://doi.
org/1
0.103
8/s43
247-
023-
01096
-7" \h

] [
HYPE
RLIN
K

"https
://doi.
org/1
0.103
8/ncli
mate2
825"

\h] [
HYPE
RLIN
K

"https
://iop
scienc
e.iop.
org/ar
ticle/1

0.108

8/174

8-

9326/

aa5ef

4" \h

]

6.8 Wildfires

Page 70

MISLEADING

Nonetheless just focusing on the post-1985 interval the number of fires [in the US] is not increasing. The area burned did increase but only until about 2007.

[[HYPERLINK "https://www.aparkwilliams.com/" \h](https://www.aparkwilliams.com/)], hydroclimatologist,
University of California

The report's section on wildfire lumps the entire US together, smearing out what's going on in the western contiguous US despite the fact that it's the rapidly increasing western US wildfire activity that necessitates this report's

wildfire section in the first place. On whether the area burnt in US forest fires has not increased: This is absolutely not the case in the western US, which is again the region that motivates most concerns about wildfire trends in the US. In the western US, the annual area burned has tripled over the past 40 years, driven by a 10-fold increase in annual forest-fire area and a doubling of area burned in non-forest. The western US forest-fire area in 2020 nearly doubled the previous modern record (from 2012) and then 2021 nearly matched 2020. The increase in area burned did not come even close to ending in 2007 in the western US.

On whether fire management practices are responsible for US wildfire trends: Beginning roughly a century ago, the widespread implementation of fire-suppression policies allowed people to effectively take control of wildfire in the western US, but over the past several decades the annual area burned has quickly escalated despite ever intensifying and efforts toward fire suppression. That is, today's concern over wildfire shouldn't depend on how fires of today compare to those of the pre-suppression era, but should instead be related to how the rapidly increasing wildfire sizes in the western US today are occurring despite society's best efforts to avoid such a trend. Further, it's not simply the growing sizes of fires that are of concern. Fire size is simply easy to measure reliably. But as fires have grown larger, they have increasingly put people and property in the paths of flames, had such a negative impact on air quality that trends toward cleaner air since the 1980s have reversed even across much of the eastern US, and rapid increases in the extents of forest area burning at high severities have endangered many forest ecosystems despite fire being a natural ecosystem process."

Quote from [[HYPERLINK "https://science.feedback.org/review/misleading-u-s-department-energy-climate-report-chooses-bias-over-science-climate-scientists-say/"](https://science.feedback.org/review/misleading-u-s-department-energy-climate-report-chooses-bias-over-science-climate-scientists-say/)] \h]

7 Changes in sea level

Page 75

FALSE

In evaluating AR6 projections to 2050 (with reference to the baseline period 1995-2014), almost half of the interval has elapsed by 2025, with sea level rising at a lower rate than predicted.

[[HYPERLINK "https://www.pik-potsdam.de/~stefan/" \h](https://www.pik-potsdam.de/~stefan/)], professor of physics of the oceans, University of Potsdam

Possibly they ignored acceleration, an observed fact, thus assuming that in the first half of the period half of the projected rise should have occurred. But, of course, the IPCC projections account for acceleration, so less than half of the rise should have occurred until now. In fact, projecting sea level rise until 2050 just by extrapolating the observed rise, including the observed acceleration, matches almost exactly the IPCC projections even though these are made in a completely different way.

Looking at the data, for the intermediate point 2030, the AR6 predicts a best estimate 9-10cm, relative to the same base period 1995-2014 (Table 9.9 of AR6 WG1). The satellite data show a rise of 74mm from that base period until 2025. At the same rate, that will be 93mm by 2030, well within in the best-estimate prediction.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://agu
pubs.
onlin
elibra
ry.wil
ey.co
m/doi
/10.10
29/20
24GL
11294
0" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.ipc
c.ch/r
eport/
ar6/w
g1/do
wnlo
ads/re
port/I
PCC_
AR6_
WGI_
Chapt
er09.p
df"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://seal
evel.c
olora

do.ed

u/" \h

]

7 Changes in sea level

Page 75

FALSE

US tide gauge measurements reveal no obvious acceleration beyond the historical average rate of sea level rise.

[[HYPERLINK "https://www.pik-potsdam.de/~stefan/" \h](https://www.pik-potsdam.de/~stefan/)], professor of physics of the oceans, University of Potsdam

Most US tide gauges show acceleration, on the east coast that is statistically significant and larger than the global average acceleration, on the west coast less so.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://tamino.wordpress.com/2025/08/11/sea-level-rise-in-the-u-s-a/" \h](https://tamino.wordpress.com/2025/08/11/sea-level-rise-in-the-u-s-a/)]

7.1 Global sea level rise

Page 75

MISLEADING

Following the end of the Little Ice Age in the mid-19th century, tide gauges show that the global mean sea level began rising during the period 1820-1860, well before most anthropogenic greenhouse gas emissions.

[[HYPERLINK "https://www.pik-potsdam.de/~stefan/" \h](https://www.pik-potsdam.de/~stefan/)], professor of physics of the oceans, University of Potsdam

While it is true that that's before "most of" greenhouse gas emissions, it is unfair to compare the "start of" the rise with "most of" emissions. The industrial era is usually assumed to start in 1700 and CO2 concentration also starts to rise noticeably around 1820-1860, around the same time as sea level (see the Keeling curve).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.nat
ure.co
m/arti
cles/s
41467
-022-
28564
-6" \h
][
HYPE
RLIN
K
"https
://bsk
y.app
/profi
le/rah
mstor
f.bsky
.social

/post/
3lw5b
amon
us2r"
\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 84

MISLEADING

AR6 states that natural external drivers since 1850-1900 have changed global surface temperature by -0.1C to +0.1C, and internal variability has changed it by -0.2C to +0.2C – on average having essentially no net impact on the warming since 1850-1900.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27560"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27560) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

The AR6 report presents this in Fig. SPM.2 as "Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900". This refers to the net effect of

various climate drivers on global surface temperature between these two periods, not the maximum changes observed. The accompanying range represents the uncertainty in these estimates. It is therefore misleading to claim that AR6 asserts natural drivers have changed global temperature by $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ since 1850-1900. In reality, Fig. SPM.1 shows that natural variability has led to temperature fluctuations of up to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ at different times, but the net contribution of natural drivers to long-term warming is estimated at around $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/" \h](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/)]

8.3 Attribution of global warming

Page 84

MISLEADING

As discussed below, this minimal contribution of natural variability has been disputed by several publications that question the magnitudes of solar variability and internal variability from large-scale ocean circulations.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27561" \h](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27561)],

astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

This claim is supported by only a small number of studies that rely on cherry-picked, outdated, or scientifically implausible TSI reconstructions (e.g., Connolly et al. (2021) and (2023); Scafetta (2023); Soon et al. (2023); Grok et al.

(2025); and Green and Soon (2025)). All of these studies rely heavily on the Hoyt and Schatten (1993) TSI series, which has been extensively criticised and discredited by Chatzistergos (2024) for its arbitrary adjustments, methodological flaws and use of fabricated data. As such, these claims do not reflect a broadly accepted scientific view. The review by Chatzistergos et al. (2023) provides a comprehensive and up-to-date overview of our current understanding of long-term solar irradiance variations and also explains why the practices underlying such claims are scientifically flawed. I note that although the Chatzistergos et al. (2023) review is cited in the DoE report, it is referenced for an unrelated and irrelevant reason and its core content is disregarded.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.scie
ncedi
rect.c
om/sc
ience/
article
/pii/S
13646
82623
00148
7" \h
][
HYPE
RLIN
K
"https

://link
.sprin
ger.co
m/arti
cle/10
.1007/
s1120
7-024-
02262
-6" \h
]

8.3 Attribution of global warming

Page 84

MISLEADING

AR5 concluded that the best estimate of radiative forcing due to Total Solar Irradiance (TSI) changes over the period 1750–2011 was very small (0.05 W/m², Myrhe et al. (2014)).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27562"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27562) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

This is an example of imprecise wording that could be misleading. In AR5, the solar radiative forcing difference between the 1745 and 2008 activity minima was estimated using TSI reconstructions from Wang et al. (2005), Steinhilber et al. (2009) and Krivova et al. (2010). These studies yielded a range of -0.02 to 0.071 Watts per metre squared (W/m²) for the difference (based on seven-year running means, with the caveat that the -0.02 W/m² value comes from Steinhilber et al. (2009), which has a five-year resolution and uses 1965 as the minimum). Based on these estimates, AR5 adopted a range of 0-0.1 W/m² with a central estimate of 0.05 W/m², as explicitly stated in Table 8.SM.4 of the report. However, AR6 defined solar forcing in a different way to reflect the difference between full solar cycles rather than solar minima, as noted in chapter 7 of the WG1 report. This change in methodology is not acknowledged in the DoE report, which may lead to misunderstandings or incorrect comparisons between AR5 and AR6 values.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WGI_AR5.Chap_8_SM.pdf"](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WGI_AR5.Chap_8_SM.pdf) \h]

8.3 Attribution of global warming

Page 84

MISLEADING

AR6 acknowledges substantially higher values and a much larger range of estimates of changes in TSI over the last several centuries, stating that the TSI between the Maunder Minimum (1645-1715) and the second half of the 20th

century increased by 0.7–2.7 W/m², a range that includes both low and high variability TSI data sets (Gulev (2021)).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27561"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27561) \h],

astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

The sentence is vague (in particular as to what they refer with "higher values") and potentially conflates two related but distinct concepts: radiative forcing and TSI differences, which were both mentioned but not clearly distinguished. Considering that the previous sentence discusses radiative forcing, one can assume that with "higher values" they refer to radiative forcing too, which would make the statement false. This is easily understood by comparing the statements in AR6 and AR5 about the range of solar radiative forcing.

The AR6 WG1 report (page 958) states:

"In contrast to AR5, the solar effective radiative forcing (ERF) in this assessment uses full solar cycles rather than solar minima. The pre-industrial TSI is defined as the mean from all complete solar cycles from the start of the 14C SATIRE-M proxy record in 6755 BCE to 1744 CE. The mean TSI from solar cycle 24 (2009–2019) is adopted as the assessment period for 2019. The best estimate solar ERF is assessed to be 0.01 W/m², using the 14C reconstruction from SATIRE-M, with a likely range of -0.06 to +0.08 W/m² (medium confidence). The uncertainty range is adopted from the evaluation of Lockwood and Ball (2020), who performed a Monte Carlo analysis of solar activity from the Maunder Minimum to 2019 using several datasets, resulting in an ERF range of -0.12 to +0.15 W/m². The Lockwood and Ball (2020) full uncertainty range is halved since the period of reduced solar activity in the Maunder

Minimum had ended by 1750 (medium confidence)." By comparison, the AR5 WGI report (page 689) states:

"The best estimate from our assessment of the most reliable TSI reconstruction gives a seven-year running mean radiative forcing (RF) between the minima of 1745 and 2008 of 0.05 W/m². Our assessment of the range of RF from TSI changes is 0.0 to 0.10 W/m²."

Thus, the solar radiative forcing estimates in AR5 and AR6 are broadly consistent, with AR6's best estimate slightly lower. If the statement instead refers to TSI differences, this would also be misleading. The AR6 WGI (page 297) lists a TSI difference between the Maunder Minimum and the second half of the 20th century ranging from 0.7 to 2.7 W/m². The lower bound likely corresponds to the SATIRE-T reconstruction, while the upper bound comes from the Yeo et al. (2020) constraint on the dimmest possible state of the sun. It is important to note that Yeo et al. (2020) does not reconstruct TSI during the Maunder Minimum but rather provides a theoretical constraint on the minimum plausible solar irradiance. This constraint effectively excludes TSI reconstructions with large amplitude variability, such as Egorova et al. (2018). Almost all current TSI reconstructions indicate significantly smaller long-term TSI trends (Chatzistergos et al. (2023)). These include the SATIRE and NRL (now NNL) models recommended for CMIP6 and AR6.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.

org/1
0.101
6/j.jas
tp.202
3.106
150"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.102
9/202
0GL0
90243
" \h]
[
HYPE
RLIN
K
"https
://roy
alsoci
etypu
blishi
ng.or
g/doi/
10.10
98/rs
pa.20
20.00
77"
\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 84

FALSE

The IPCC has only minimally discussed solar influences on global and regional climate.

[[HYPERLINK "http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html" \h](http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html)], professor of space environment physics and president of the Royal Astronomical Society, University of Reading

Contrary to this statement, there is much discussion in the last three IPCC assessment reports.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/" \h](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/)]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

There is substantial evidence for high solar activity in the second half of the 20th century (starting in 1959) and extending into the 1990s, before a decline in the early 21st century; this period is often termed the “Modern Maximum” (Chatzistergos et al. (2023); Solanki et al. (2004); Usoskin et al. (2007)).

However, some scientists have concluded that it is not possible to be confident

of any multi-decadal trend in TSI (Schmutz (2021)).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/person/27558/2169" \h](https://www.mps.mpg.de/person/27558/2169)],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

“Although the sentence in which they cite us is factually accurate in isolation, the surrounding text creates a misleading impression. More importantly, our review paper, which they cited, explains why their subsequent paragraph has misleading and wrong statements.”

Quote from [[HYPERLINK "https://bsky.app/profile/damagedonegr.bsky.social" \h](https://bsky.app/profile/damagedonegr.bsky.social)]

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682623001487?via%3Dihub" \h](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682623001487?via%3Dihub)]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, the recommended forcing dataset for the CMIP6 climate model simulations used in AR6 for attribution studies averages two data sets with low solar variability (Matthes (2017)).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558" \h](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558)],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

This sentence creates a misleading impression that, although AR6 acknowledged the possibility of high secular trends in total solar irradiance (TSI), it arbitrarily dismissed them in favor of two TSI reconstructions with relatively low variability. In fact, the 2.7 W/m² figure cited in AR6 should not be

interpreted as an actual historical TSI difference between the Maunder Minimum and the present, but rather as a physical upper bound on the maximum plausible difference between the sun's dimmest possible state and its current irradiance. Importantly, the Maunder Minimum is unlikely to represent this dimmest state and modern TSI reconstructions suggest a substantially smaller long-term trend than what a 2.7 W/m² Maunder-to-present difference would imply. This upper limit, derived from Yeo et al. (2020), effectively excludes high-variability TSI reconstructions that exceed this threshold. For this reason, the CMIP6 and IPCC AR6 selected two TSI reconstructions, SATIRE (Yeo et al. (2014) and Wu et al. (2018)) and NRLTSI (now referred to as NNLSI, Coddington et al. (2016), not based on their implied variability magnitude, but because they represent the most advanced, scientifically robust, and rigorously validated models currently available (Matthes et al. (2017)). SATIRE is a semi-empirical, physics-based model, whereas NRLTSI is a proxy-based regression model. Both have undergone extensive scrutiny and show excellent agreement with direct satellite measurements of TSI.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://gm
d.cop
ernic
us.or
g/arti
cles/1
0/224
7/201
7/gm

d-10-
2247-
2017-
discu
ssion.
html"
\h][
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.nat
ure.co
m/arti
cles/s
41550
-017-
0217-
y" \h
l

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

While AR6 shows a substantially greater solar impact than does AR5, the overall impact of solar forcing on the climate was still assessed to be small compared to anthropogenic forcing.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558" \h](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558)],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

The statement is vague and unclear in what it means by “AR6 shows a substantially greater solar impact than AR5”, especially since the same sentence acknowledges that solar forcing was assessed to be small compared to anthropogenic forcing, implying a correspondingly small solar impact. This apparent contradiction likely stems from confusion on the part of the DoE authors regarding the distinction between radiative forcing and total solar irradiance (TSI) differences as presented in AR5 and AR6, as discussed in previous comments.

Quote given to Carbon Brief

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, the impact of solar variations on the climate is uncertain and subject to substantial debate (Lockwood (2012); Connolly et al. (2021)) - something that is not evident in the IPCC assessment reports.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559" \h](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559)],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

AR6 acknowledges the high-variability reconstruction by Egorova et al. (2018) and references studies by Yeo et al. (2020) and Lockwood & Ball (2020), discussing the inherent uncertainty in estimating the secular trend in solar irradiance variations. The earlier study by Lockwood (2012) is not included because its findings are superseded by the more recent Lockwood & Ball (2020). Mike Lockwood was actually one of the contributors to AR6. Thus, IPCC AR6 did adequately discuss the existing uncertainty in irradiance modelling and, thus, its effects on Earth's climate. However, what the authors of the DoE report seem to mean with this sentence is that AR6 does not discuss the Connolly et al. (2021) study. It is worth repeating that the Connolly et al. (2021) paper gave a misleading presentation of the literature. In particular, Connolly et al. (2021) cherry-picked 16 TSI reconstructions, deliberately balancing the sample by including eight with small long-term trends and eight with pronounced trends. However, their inclusion of several outdated or discredited models within the high-variability group is misleading, particularly given the DoE chapter summary's claim that all selected reconstructions are plausible (Chatzistergos et al. (2023) and Chatzistergos (2024)).

As noted in previous comments, the issues with Connolly et al. (2021) undermine the credibility of their results. While there is legitimate uncertainty about the exact magnitude of long-term solar irradiance trends, Connolly et al. (2021) exaggerated the solar impact by cherry-picking outdated and superseded series that display implausibly large TSI variations.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[Link1](#)

[Link2](#)

[Link3](#)

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

There are several rival composite TSI datasets that disagree as to whether TSI increased or decreased during the period 1986-96.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559) \h],

astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

It is also important to note that the effect of ACRIM-gap in the trends of the different TSI composites is generally small (Chatzistergos et al. (2023) and Kopp (2025)). While the issue with ACRIM does contribute to the uncertainty in the long-term trend of direct TSI measurements, a growing body of evidence challenges the notion of a TSI increase during the ACRIM-gap, evidence which the DoE report entirely overlooks. Notable examples include Amdur & Huybers (2023), Chatzistergos et al. (2025) and Krivova et al. (2009). By having given such emphasis on the ACRIM-gap the DoE report gives the misleading impression that there can be significant increase in TSI, which could account for the global warming over the same period. Thus, this statement can be misleading.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[Link1](#)

[Link2](#)

[Link3](#)

[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s41116-025-00040-5" \h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

Further, the satellite record of TSI is used to calibrate proxy models that infer past solar variations from sunspots and cosmogenic isotope measurements (Velasco Herrera et al. (2015)).

[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27560" \h],

astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

There are several issues with this sentence, particularly concerning the choice of the sole reference, which may mislead readers into believing that existing total solar irradiance (TSI) reconstructions depend heavily on direct TSI measurements for determining long-term trends. This is generally incorrect. Moreover, the phrasing gives the impression that only proxy models exist, overlooking the important class of physics-based semi-empirical models.

1) Missing relevant literature: The statement omits key papers on irradiance reconstruction models (e.g., Coddington et al. (2016); Wu et al. (2018); and Chatzistergos et al. (2024)) and authoritative reviews (e.g., Chatzistergos et al. (2023) and (2024); and Solanki et al. (2013)) that provide a more accurate and

comprehensive perspective.

2) Choice of reference: The DoE cites only Velasco Herrera et al. (2015) to support the claim, which is problematic. That work is not an irradiance reconstruction model but a machine learning extrapolation inherently dependent on the chosen TSI reference series. Given the chaotic nature of solar activity, such extrapolations from limited data lack scientific merit (see Petrovay (2020)). Moreover, the predictions from Velasco Herrera et al. (2015) for 2015–25 are already contradicted by actual direct TSI measurements obtained since.

3) Proxy models: These reconstruct irradiance variations by scaling or regressing solar activity indices against reference TSI data. While the choice of reference series can influence results depending on the regression method, the effect is not always big. For example, Chatzistergos et al. (2020) demonstrated that the choice of TSI reference has negligible impact on minimum-to-minimum trends in their regression model. Similarly, Figure 7c in Chatzistergos et al. (2024) shows only a minor effect of different TSI references on their century-long TSI reconstruction.

4) We have not only proxy models but also physics-based semi-empirical models. Models such as SATIRE and SRPM do rely on tuning some free parameters by comparison to direct TSI measurements. However, this tuning does not significantly affect the long-term trends, as shown in multiple studies (e.g., Chatzistergos et al. (2021)). Notably, Chatzistergos et al. (2025) explicitly states about their irradiance reconstruction with SATIRE-S that "the trend in the updated SATIRE-S TSI composite is independent of measured TSI".

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.sw
sc-
journ
al.org
/articl
es/sw
sc/abs
/2024/
01/sw
sc230
049/s
wsc23
0049.
html"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.aan
da.or
g/arti
cles/a
a/abs/
2025/
04/aa
54044
-
25/aa
54044
-
25.ht
ml"

\h] [
https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.sw

sc-

journ

al.org

/articl

es/sw

sc/abs

/2020/

01/sw

sc200

052/s

wsc20

0052.

html"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://inte

ractiv

e.carb

onbri

ef.org

/doe-

factch

eck/in

dex.h

tml"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.aan

da.or

g/arti

cles/a

a/abs/

2021/

12/aa

41516

-

21/aa

41516

-

21.ht

ml"

\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

There is substantial evidence for high solar activity in the second half of the 20th century (starting in 1959) and extending into the 1990s, before a decline in the early 21st century; this period is often termed the "Modern Maximum." (Chatzistergos et al. (2023); Solanki et al. (2004); Usoskin et al. (2007))

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27566"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27566) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

The citation of Chatzistergos et al. (2023) in support of the statement about the "Grand Modern Maximum" of solar activity is somewhat misleading. First, the cited paper is a review focused specifically on solar irradiance modeling and long-term trends in irradiance reconstructions. The Grand Modern Maximum is mentioned only briefly in the introduction and is not a subject of analysis in the paper. Moreover, the concept of the Grand Modern Maximum is primarily based on direct sunspot observations, as discussed in works such as Chatzistergos et al. (2017) and Usoskin et al. (2016), which is clearly stated in

Chatzistergos et al. (2023), but omitted in the DoE report. The other two studies cited in the DoE, Solanki et al. (2004) and Usoskin et al. (2007), inferred this period in sunspot number series reconstructed from cosmogenic isotope data. However, these data do not cover the full extent of the modern maximum, and the connection between isotope-based and direct sunspot records remains uncertain. Recent reconstructions like Wu et al. (2018; where both Sami K. Solanki and Ilya G. Usoskin are co-authors) continue to support the existence of a Grand Modern Maximum, but suggest it was less pronounced than earlier assumed.

I presume the authors do not include this study because it was used to reconstruct irradiance variations and returned a rather small secular trend, which would conflict with the claim they want to make here. It is important to recognise that elevated sunspot activity during the second half of the 20th century does not, on its own, determine how much solar irradiance increased, as information on faculae is also essential. Irradiance variations are driven not only by sunspots but also by faculae and network magnetic features.

Unfortunately, direct facular observations only extend back to 1892, and their use prior to the 1970s has been rather limited. Consequently, reconstructing past irradiance variations requires assumptions about the relationship between sunspots and faculae, which introduces uncertainty into estimates of the secular trend. However, recent efforts to extract facular information from Ca II K observations (e.g., Chatzistergos et al. (2024)) and to extend irradiance reconstructions back to 1892 indicate only a minimal long-term trend over the 20th century, consistent with state-of-the-art reconstructions such as SATIRE. As mentioned above also updated reconstructions with cosmogenic isotope data (Wu et al. (2018)) suggest a rather small long-term trend. None of this

context is provided in the DoE report, resulting in a potentially oversimplified or overstated implication that a large secular trend is more likely, despite the balance of current evidence.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
 HYPE
 RLIN
 K
 "https
 ://doi.
 org/1
 0.101
 6/j.jas
 tp.202
 3.106
 150"
 \h] [
 HYPE
 RLIN
 K
 "https
 ://doi.
 org/1
 0.100
 7/s11
 207-
 023-
 02136
 -3" \h
] [
 HYPE
 RLIN
 K
 "https
 ://doi.
 org/1
 0.105
 1/000
 4-

6361/
20173
1892"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.sw
sc-
journ
al.org
/articl
es/sw
sc/abs
/2024/
01/sw
sc230
049/s
wsc23
0049.
html"
\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, some scientists have concluded that it is not possible to be confident of any multi-decadal trend in TSI (Schmutz, 2021).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27567"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27567) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

This statement is misleading because it refers to section 3 of Schmutz (2021),

which focuses on direct measurements of solar irradiance only since 1978, whereas the DoE report in the previous sentence was discussing the grand modern maximum and thus longer-term trends beyond the period covered by direct TSI measurements. Furthermore, the uncertainty in determining the long-term trend, both from direct measurements and modeled reconstructions, is widely acknowledged in the scientific literature and is not limited to a small

group of scientists. Nevertheless, all current evidence and advances consistently indicate a relatively weak secular trend in total solar irradiance (TSI) variations.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.1016

/j.jast

p.202

3.1061

50"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.sws

c-

journ

al.org

/10.10

51/sw

sc/202

1016"

\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

This uncertainty causes some reconstructions of TSI from 1750 to have low variability (implying a very low impact of solar variations on global mean surface temperature) whereas datasets with high TSI variability can explain more than 70% of the temperature variability since pre-industrial times (Scafetta (2013); Stefani (2021)).

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27558) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

Neither of the two papers cited for the claim that "datasets with high TSI variability can explain more than 70% of the temperature variability since pre-industrial times". Stefani (2021) did not even use any TSI series; instead, he performed a linear regression between the geomagnetic aa-index and sea surface temperature. Scafetta (2013, p27) states: "Figure 15B compares the

Central England Temperature (CET) record and the TSI model by Hoyt and Schatten plus the ACRIM TSI record; an overall good correlation is observed since 1700, which suggests that the major observed climatic oscillations are solar induced and that the sun explains about 50-60% of the warming observed since 1900."

This raises two major concerns. First, the statement in the report is incorrect since neither Scafetta (2013) nor Stefani (2021) demonstrate that TSI can account for "more than 70% of the temperature variability since preindustrial times". Second, the conclusion by Scafetta (2013) relies on the Hoyt and Schatten (1993) TSI model after connecting it to the ACRIM TSI composite. The Hoyt and Schatten 1993 TSI model has been shown to be highly unrealistic and is now widely discredited (Chatzistergos (2024)). As detailed in Chatzistergos (2024), the Hoyt and Schatten model includes multiple arbitrary adjustments and fabricated data for one index spanning over a decade, which appear to have been copied from another index. Critically, the model's high variability was not a result of the model but was imposed by the authors. When updated underlying indices and direct TSI composites (e.g., PMOD, Montillet et al. (2022), ACRIM) are considered, it becomes clear that Hoyt and Schatten (1993) exaggerated TSI variation amplitudes by roughly a factor of five (Chatzistergos (2024)). The discrepancy is even greater when compared to the ACRIM TSI composite, which Hoyt and Schatten's model is incompatible with. This seriously undermines the reliability of conclusions drawn from the Hoyt and Schatten model for attributing recent climate change to solar variability.

Therefore, the two given references do not corroborate the claim of the DoE report. This statement likely originates from Connolly et al. (2023), but the

same criticisms previously discussed regarding Connolly et al. (2021) apply here as well. Connolly et al. (2021) and (2023) cherry-picked TSI reconstructions to amplify several outdated or discredited models with high secular trends. As noted in previous comments, these issues undermine the credibility of their results. While there is legitimate uncertainty about the exact magnitude of long-term solar irradiance trends, Connolly et al. (2021) and (2023) exaggerated the solar impact by cherry-picking outdated and superseded series that display implausibly large TSI variations.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.1007
/s1120
7-024-
02262
-6" \h
]
[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.1016
/j.jast
p.202
3.1061
50"
\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

The choice of TSI satellite record used in an analysis can therefore substantially influence how much climate change is attributed to human versus natural forcings.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559) \h],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

This statement is misleading and confusing. First, the choice of TSI satellite record does not substantially influence the estimated solar contribution to

climate change; rather, it is the choice of modelled TSI series, which was the topic of the previous sentence, that can have an impact. Second, as explained above, the high-variability TSI reconstructions used by Connolly et al. (2021) and (2023) to attribute most warming to the Sun are outdated, superseded, and scientifically implausible. While there is indeed uncertainty regarding the long-term trend in solar irradiance, which naturally affects the precise estimate of solar-driven global warming, all current evidence indicates this contribution is relatively small. The sentence in the DoE report, however, dramatically exaggerates this uncertainty and its implications.

However, it is also possible that the authors of the DoE report intended to suggest that the choice of TSI satellite records influences the reconstruction outcomes and thus the estimated solar contribution to global warming. This interpretation would also be misleading, as explained earlier, but reiterated here:

1) While the choice of reference TSI series can affect proxy model results depending on the regression approach, this effect is often small. For example, Chatzistergos et al. (2020) demonstrated that the choice of TSI reference has a negligible impact on minimum-to-minimum trends in their regression model. Similarly, Figure 7c in Chatzistergos et al. (2024) shows only minor differences when using various TSI references in their century-long reconstruction.

2) This effect is typically negligible in physics-based semi-empirical models. Various studies have confirmed the minimal impact on SATIRE reconstructions when changing the reference TSI series (e.g., Chatzistergos et al. 2021). Notably, for the latest version of SATIRE-S, Chatzistergos et al. (2025) explicitly

state that "the trend in the updated SATIRE-S TSI composite is independent of measured TSI".

3) As mentioned earlier, the DoE authors cited Velasco Herrera et al. (2015) instead of irradiance reconstruction models, which may have caused the confusion. Velasco Herrera et al. (2015) presented a machine learning extrapolation that inherently depends on the chosen TSI reference series. Given the chaotic nature of solar activity, such limited-data extrapolations lack scientific robustness (see Petrovay (2020)). Moreover, Velasco Herrera et al. 2015 predictions for 2015-25 have already been contradicted by direct TSI measurements collected since.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150" \h](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150)]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

FALSE

Scafetta et al. (2023) suggests that ~80% of solar influence on climate might stem from non-TSI mechanisms.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559" \h](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27559)],
astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

The reference is incorrect, there is no Scafetta et al. (2023); this should be Scafetta (2023). Although Scafetta (2023) indeed makes this claim, it is yet another such claim of attributing most global warming to the sun mainly based on the use of the discredited Hoyt and Schatten (1993) TSI series (Chatzistergos (2024)). Scafetta (2023) bases his analysis on a combination of three TSI series: Hoyt and Schatten (1993), Egorova et al. (2018) and the one recommended by CMIP6. Since the Hoyt and Schatten (1993) TSI series was not updated prior to Chatzistergos (2024), Scafetta extended it by linking it to the ACRIM TSI composite. Chatzistergos (2024) demonstrated that the high variability imposed by Hoyt and Schatten (1993) is inconsistent with direct TSI measurements and that a variability magnitude approximately five times smaller is required.

Additionally, Chatzistergos (2024) showed that the Hoyt and Schatten (1993) model conflicts particularly with the ACRIM composite by exhibiting opposite trends during the so-called ACRIM-gap, making Scafetta's extension of Hoyt and Schatten (1993) with ACRIM invalid. Thus, with Egorova et al. (2018) exceeding the Yeo et al. (2020) physical constraint, and considering the multiple methodological issues identified with the Hoyt and Schatten (1993) series (Chatzistergos (2024)), the resulting conclusions by Scafetta (2023) are unlikely. Furthermore, Scafetta himself acknowledged that even when allowing for solar effects beyond radiative forcing, the solar influence remains minimal with the CMIP6 TSI forcing. Therefore, the claim that solar influence accounts for more than 80% of warming is unsupported.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s11207-024-02262-6"](https://doi.org/10.1007/s11207-024-02262-6) \h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

There are numerous candidate processes, including solar ultraviolet changes; energetic particle precipitation; atmospheric-electric-field effect on cloud cover; cloud changes produced by solar-modulated galactic cosmic rays; large relative changes in the magnetic field; and the strength of the solar wind. Such solar indirect effects are not included in climate models, although indirect methods of estimating their impacts suggest they are significant.

[[HYPERLINK "https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27560"](https://www.mps.mpg.de/solar-physics/staff/27560) \h],

astrophysicist, Max Planck Institute for Solar System Research

It is exaggerated and incorrect to claim that the impacts of such effects are significant. Many of these effects are described vaguely in the DoE report, making their implications unclear (for example, "large relative changes in the magnetic field") without specifying what that entails. Additionally, the influence of cosmic rays on cloud formation has been shown to be negligible, as demonstrated by the CLOUD experiment at CERN (Pierce (2017)). While some effects on Earth's atmosphere from other processes have been studied (e.g., Mironova et al. (2015) and Sinnhuber & Funke (2020)), their effects are generally considered to be small.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://onli
nelibr
ary.w
iley.c
om/d
oi/abs
/10.10
02/20
17JD0
27475
" \h]
[
HYPE
RLIN
K
"http:
//adsa
bs.har
vard.
edu/a
bs/20
15SSR
v..194
....1M
" \h]
[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.scie
ncedi
rect.c
om/sc
ience/
article
/pii/B

97801

28133

71200

0093"

\h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, the recommended forcing dataset for the CMIP6 climate model simulations used in AR6 for attribution studies averages two data sets with low solar variability (Matthes, (2017)).

[[HYPERLINK "http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html"](http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html) \h], professor of space environment physics and president of the Royal Astronomical Society, University of Reading

The statement is true, but very misleading as it is made to sound that larger TSI-drift papers were ignored. There is only one very high TSI drift reconstruction and it is very much an outlier – other reconstructions show much smaller drift. There is also analysis of recent solar cycles that shows that the low TSI change reconstructions are correct.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2020.0077"](https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2020.0077) \h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, the impact of solar variations on the climate is uncertain and subject to substantial debate (Lockwood (2012); Connolly et al. (2021)) – something that is not evident in the IPCC assessment reports.

[[HYPERLINK "http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html"](http://www.personal.reading.ac.uk/~ym901336/index.html) \h], professor of space environment physics and president of the Royal Astronomical Society, University of Reading

This is highly misleading as it conflates regional and global climate. The cited references were discussing regional climates where there is more uncertainty and some (limited) solar influence through downward propagation of stratospheric responses, especially in winter. The global climate is not open to such uncertainty. The cooling (as opposed to warming) of the global stratosphere shows conclusively that the effect of solar change on the global climate is minimal compared to effects of changing solar irradiance.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1305332110"](https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1305332110) \h]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

However, the recommended forcing dataset for the CMIP6 climate model

simulations used in AR6 for attribution studies averages two data sets with low

solar variability (Matthes (2017)).

[[HYPERLINK "https://www.geomar.de/en/kmatthes" \h](https://www.geomar.de/en/kmatthes)], director, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

It is correct that the long-term trend in TSI is rather on the low variability side, but it is completely ignored that other more extreme trends (high variability trends) are completely unrealistic. We only provide an extreme Maunder Minimum case as a sensitivity experiment.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://gmd.copernicus.org/articles/10/2247/2017/" \h](https://gmd.copernicus.org/articles/10/2247/2017/)]

8.3 Attribution of global warming

Page 85

MISLEADING

While AR6 shows a substantially greater solar impact than does AR5, the overall impact of solar forcing on the climate was still assessed to be small compared to anthropogenic forcing. However, the impact of solar variations on the climate is uncertain and subject to substantial debate (Lockwood (2012); Connolly et al. (2021) – something that is not evident in the IPCC assessment reports. The variations of TSI over time remains a challenging problem. Since 1978, there have been direct measurements of TSI from satellites. However, the data exhibits non-negligible inconsistencies, and interpreting any multi-decadal trends in TSI requires comparisons of observations from overlapping satellites. There are several rival composite TSI datasets that disagree as to

whether TSI increased or decreased during the period 1986-96 (the ACRIM gap; see Chapter 4). Further, the satellite record of TSI is used to calibrate proxy models that infer past solar variations from sunspots and cosmogenic isotope measurements (Velasco Herrera et al. (2015)). There is substantial evidence for high solar activity in the second half of the 20th century (starting in 1959) and extending into the 1990s, before a decline in the early 21st century; this period is often termed the "Modern Maximum". (Chatzistergos et al. (2023); Solanki et al. (2004); Usoskin et al. (2007)). However, some scientists have concluded that it is not possible to be confident of any multi-decadal trend in TSI (Schmutz (2021)). This uncertainty causes some reconstructions of TSI from 1750 to have low variability (implying a very low impact of solar variations on global mean surface temperature) whereas datasets with high TSI variability can explain more than 70% of the temperature variability since pre-industrial times (Scafetta (2013); Stefani (2021)). The choice of TSI satellite record used in an analysis can therefore substantially influence how much climate change is attributed to human versus natural forcings.

[[HYPERLINK "https://www.geomar.de/en/kmatthes"](https://www.geomar.de/en/kmatthes) \h], director, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

In Matthes et al. (2017), we conclude the following two points (just as an example of mis-citation):

- 1) A new and lower TSI value is recommended: the contemporary solar-cycle average is now $1,361.0 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ (Prša et al. (2016)).
- 2) Over the last three solar cycles in the satellite era, there is a slight negative TSI trend in the CMIP6 dataset. A recent reconstruction of the TSI, with a proper estimation of its uncertainties, suggests that this downward trend between the solar minima of 1986 and 2009 is not statistically significant

(Dudok de Wit et al. (2017)). The TSI trend leads to an estimated radiative forcing on a global scale of -0.04 W/m^2 , which is small in comparison with other forcings over this period.

Therefore the sentence in the DoE report stating that the “choice of TSI satellite record used in an analysis can therefore substantially influence how much climate change is attributed to human versus natural forcings” is completely wrong and ignores the thorough science. The radiative forcing to this natural forcing – even if we would have chosen a different TSI dataset – is small (-0.04 W/m^2).

The next completely wrong statement is that “such solar indirect effects are not included in climate models”. In Matthes et al. (2017), we provide a comprehensive dataset including TSI and solar spectral irradiance data as well as solar particle forcing for the first time. We also provide an ozone dataset with the indirect effect included. Many of the CMIP6 models do include spectral solar irradiance as well as ozone changes, so the indirect effect and some even the particle effects. I am really shocked about these wrong statements. The IPCC is based on sound scientific evidence and this DoE report is kicking the evidence with feet. Misinterpreting and mis-citing or not at all citing important work (such as the important parts of Matthes et al. (2017) where we provide sound scientific evidence and discuss the details) – this is just horrible. By taking out only parts of the story and “simplifying it”, it is becoming simply wrong. This is not sound science.”

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://gm
d.cop
ernic
us.or
g/arti
cles/1
0/224
7/201
7/" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https
://iop
scienc
e.iop.
org/ar
ticle/1
0.384
7/000
4-
6256/
152/2/
41"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://agu
pubs.
onlin
elibra
ry.wil
ey.co
m/doi
/10.10
02/20
16GL

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

MISLEADING

Arguably the most striking change in the Earth's climate system during the 21st century is a significant reduction in planetary albedo since 2015, which has coincided with at least two years of record global warmth. Figure 8.2 shows the planetary albedo variations since 2000, when there are good satellite observations. The 0.5% reduction in planetary albedo since 2015 corresponds to an increase of 1.7 W/m² in absorbed solar radiation averaged over the planet (Hansen and Karecha (2025)). For comparison, Forster et al. (2024) estimate the current forcing from the increase in atmospheric CO₂ compared to pre-industrial times to be 2.33 W/m².

[[HYPERLINK "https://environment.leeds.ac.uk/see/staff/1267/professor-piers-forster"](https://environment.leeds.ac.uk/see/staff/1267/professor-piers-forster) \h], professor of climate physics, University of Leeds

[The citation] is correct, but it presents a somewhat incomplete comparison with the absorbed solar radiation. One's a very long-term forcing, the other is a mix of forcing and response over a shorter period, so the two numbers are not very comparable. All Earth's energy budget terms need to be considered and understood together. And when all components are analysed together, the cause of the Earth's energy balance can be traced to GHG warming and the Earth's system response with a good degree of certainty, as explained by the

Hodnebrog et al. (2024) paper already referenced. This text as written is ok, but for me it plays up the uncertainties somewhat.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ess
d.cop
ernic
us.or
g/arti
cles/1
7/264
1/202
5/" \h
][
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.nat
ure.co
m/arti
cles/s
43247
-024-
01324
-8" \h
]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

FALSE

Arctic sea ice extent has declined by about 5% since 1980

Anonymous

September sea ice (1979-88 average compared to 2015-24 average) is 34% lower today according to OSISAF [Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility] observations and 35% lower according to NSIDC [National Snow and Ice Data Center]. For the annual mean sea ice extent, the percentage reduction is 14% according to NSIDC and OSISAF. The number is higher in summer because that is when there is the most sea ice loss and the seasonal minimum, so the least amount to start with. In addition, the evidence given to support this statement links to a figure showing sea ice decline in Antarctica in July.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-420"](https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-420) \h]

[[HYPERLINK "https://nsidc.org/sea-ice-today/sea-ice-tools"](https://nsidc.org/sea-ice-today/sea-ice-tools) \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

MISLEADING

...although following 2007 there has been a pause in the Arctic sea ice decline (England et al. (2025)).

Anonymous

What they say is true and is correctly cited, but lacking context. In the latest version published recently [the DoE report cites a preprint version], the authors note that they “find that the existence of this slowdown also predisposes the sea ice cover for a more rapid decline in the near future”. They add that they “would like to underscore that pause or slowdown are used interchangeably to refer to an extended period with little or no decline in sea ice cover, due to the observed realisation of multi-decadal climate variability on top of the response to anthropogenic forcing, temporarily interrupting the ongoing long-term reduction in Arctic sea ice. This does not imply a cessation of human-induced climate change and, instead, it is likely that sea ice would have increased over this period without human influence.”

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL116175?af=R"](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL116175?af=R) \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

MISLEADING

Regarding Antarctic sea ice, the IPCC AR6 concludes that "There has been no significant trend in Antarctic sea ice area from 1979 to 2020 due to regionally opposing trends and large internal variability." (Summary for Policymakers, A.1.5)

Anonymous

While this is true, it is misleading because they neglect to mention that Antarctic sea ice cover has had a dramatic decline since 2015 and the last few years have seen record lows. Studies have found that these record lows were unlikely to have happened before over the last century. Missing out the last few years of Antarctic sea ice trajectory is a huge omission.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.nat
ure.co
m/arti
cles/s
41558
-021-
01254
-9" \h
]]

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.nat

ure.co

m/arti

cles/s

43247

-025-

02107

-5" \h

]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Pages 101-103

MISLEADING

Section 8.4

[[HYPERLINK "https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html"](https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html) \h], climate physicist and group leader, Alfred Wegener Institute

The authors manage to avoid statements that are individually clearly wrong. It is even somewhat difficult to nail down individual sentences that would be clearly misleading taken alone, because that depends on the context they are placed in. However, considering the section as a whole, I think it's pretty clear that they are over-emphasising uncertainties and the possible relative role of natural variability while down-playing the two other main possible mechanisms behind the albedo decline of the last two and a half decades, namely a possibly emerging positive low-cloud feedback and (largely indirect) aerosol effects.

Quote given to Carbon Brief

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Pages 101-103

MISLEADING

Section 8.4

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

I did not spot major errors in the section on planetary albedo, although I consider that there is an emphasis on abruptness of temperature and albedo changes, which artificially emphasise the role of natural variability. which could be misleading.

Quote given to Carbon Brief

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

MISLEADING

A sharp recent increase in global average temperatures has raised the question of short-term drivers of climate. One such candidate is the fraction of absorbed solar radiation which has also increased abruptly in recent years. The question is whether the change is an internal feedback to warming caused by greenhouse gases, or whether something else increased the fraction of absorbed radiation which then caused the recent warming.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

A "sharp recent increase in global temperature" and "the fraction of absorbed solar radiation which has also increased abruptly" are potentially misleading since while both global surface temperature and absorbed solar radiation have varied with ENSO, they have also increased steadily over time (Loeb et al. (2024) and Forster et al. (2024)). This wording could artificially emphasise the role of natural variability.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s10712-024-09838-8"](https://doi.org/10.1007/s10712-024-09838-8) \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 90

MISLEADING

Arguably the most striking change in the Earth's climate system during the 21st century is a significant reduction in planetary albedo since 2015, which has coincided with at least two years of record global warmth.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

Planetary albedo has decreased before 2015 as well as after, though the decreases are larger around 2012-14 (increases in absorbed sunlight in Loeb et al. (2024), Fig. 5a). Decreases in reflected sunlight up to 2016 are captured by some climate models applying observed SST (Loeb et al. (2020)), suggesting that they are a response to global warming and its spatial pattern (Andrews et al. (2022)), though it is not clear how much of the pattern of global warming is explained by radiative forcing and how much internal variability.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "http://doi.org/10.1029/2019GL086705"](http://doi.org/10.1029/2019GL086705) \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 91

MISLEADING

The issue then becomes the cause of the change in cloud cover. Two explanations have been posited for the declining cloud cover over the past decade: • Natural climate variability • Changes in low cloud cover associated with warming sea surface temperatures, implying an emerging positive feedback to climate change (Hansen and Karecha (2025))

[[HYPERLINK "https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html"](https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html) \h], climate physicist and group leader, Alfred Wegener Institute

Maybe even more importantly, they omit the third major possible mechanism behind the cloud-cover decline altogether, namely indirect aerosol effects. They do mention aerosols and recent aerosol emission reductions, but only prior to the part where they state that the main reason for the albedo-decline seems to be related to clouds (which, by itself, is true). They write: “The issue then becomes the cause of the change in cloud cover. Two explanations have been posited for the declining cloud cover over the past decade.” However, the indirect aerosol effect, although uncertain, is likely even stronger than the direct aerosol effect, and it is an important candidate for explaining a part of the recent cloud-cover decline. By omitting this completely, they further emphasise the relative importance of natural variability to a degree that can not be considered appropriate.

Quote given to Carbon Brief

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 91

MISLEADING

Surface albedo changes have thus contributed only weakly to the recent planetary albedo decline, particularly when averaged annually and globally.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

Surface albedo has also contributed significantly to the decline in global albedo according to Loeb et al. (2024), which accounts for cloud masking: "...part of the positive –SW trend is impacted by decreases in surface albedo from declining sea-ice coverage during the CERES period". However, this applies to the period since 2000, rather than during 2015, which line 10 [of the DoE report] is referring to, while the decrease in planetary albedo has been observed over the full CERES period rather than just in 2015 (Loeb et al. (2024)).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s10712-024-09838-8" \h](https://doi.org/10.1007/s10712-024-09838-8)]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 91

MISLEADING

Loeb et al. found that decreases in low- and mid-level clouds since 2015 are the primary reason for decreasing planetary albedo in the northern hemisphere, whereas in the southern hemisphere the decrease in planetary albedo is primarily due to decreases in mid-level clouds across all latitude zones.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/" \h](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/)], professor of climate science, University of Reading

The stated "decreases in low- and mid-level clouds" is misleading since Loeb et al. (2024) find decreases in cloud cover and also reflectance have contributed to the increase in absorbed sunlight along with surface albedo decreases (that can be related to ice melt elsewhere in the article): "[W]e find that decreases in low

and middle cloud fraction and reflection and reduced reflection from cloud-free areas in mid-high latitudes are the primary reasons for increasing ASR [absorbed solar radiation] trends in the [northern hemisphere]...In the [southern hemisphere] the increase in ASR is primarily from decreases in middle cloud reflection and a weaker reduction in low-cloud reflection." The increase in reflection counters arguments presented that the decreases in aerosol are not influencing the decreases in albedo as their effect on making clouds brighter diminishes (e.g. Hodnebrog et al. (2024)), while the additional steady rise in ASR during the CERES period is also consistent with cloud and ice-albedo feedbacks to warming (Forster et al. (2021); Tselioudis et al. (2025); and Norris et al. (2016)) as well as declining global aerosol emissions (Quaas et al. (2022)).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s10712-024-09838-8>" \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 91

MISLEADING

The issue then becomes the cause of the change in cloud cover. Two explanations have been posited for the declining cloud cover over the past decade: • Natural climate variability • Changes in low cloud cover associated with warming sea surface temperatures, implying an emerging positive feedback to climate change (Hansen and Karecha (2025))

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/" \h](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/)], professor of climate science, University of Reading

Two explanations for decreased global albedo are presented, but the decline in ocean aerosols is ignored and this has been identified as an important driver of decreased global albedo (e.g. Hodnebroeg et al. (2024)). Combined with overemphasis of the abruptness of changes, this is potentially misleading since it overemphasises the role of natural variability.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1038/s43247-024-01324-8" \h](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01324-8)]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 92

MISLEADING

It is not easy to justify a new positive low cloud feedback that began emerging in 2015 since there is no obvious feedback trigger starting at that time.

[[HYPERLINK "https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html" \h](https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html)], climate physicist and group leader, Alfred Wegener Institute

I think this is an example of a "straw man argument", because it's clear that there would not be a trigger starting exactly at some point. Rather, a forced signal (like a positive cloud feedback) would be superimposed by natural variations, and at some point, depending on signal-to-noise ratio (and possible other forcings) and how the associated forcing grows, the forced signal can

emerge from the noise. An associated timeseries may just look like something kicked in at a specific time.

Quote given to Carbon Brief

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 92

MISLEADING

However, there are numerous natural climate signals during this period that are associated with atmospheric circulation changes that can influence the distribution of clouds:

- *The 2014-16 was one of the strongest El Niño events on record.*
- *A cold anomaly beginning in 2015 in the subpolar gyre of the North Atlantic reflects a shift in the ocean circulation pattern associated with decadal variability in the Atlantic (Frajka-Williams et al. (2017); Arthun et al. (2021)).*
- *The Pacific Decadal Oscillation positive index peaked in 2016, then declined and has been in negative territory since late 2019.*
- *Eruption of the submarine Hunga-Tonga volcano in 2022.*

[[HYPERLINK "https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html"](https://www.awi.de/en/about-us/service/expert-database/translate-to-english-helge-goessling.html) \h], climate physicist and group leader, Alfred Wegener Institute

When it comes to natural variability, they are listing quite comprehensively which aspects of natural variations could – in principle – have had an impact on planetary albedo, in part also overemphasising some aspects that rather clearly can not have had a major impact on the longer-term decline, such as ENSO (as we also investigated in our paper). Also their interpretation of results for the

Hunga Tonga eruption and its possible contribution to the recent warming

surge seems not to be a balanced representation of the recent literature about it, which does not suggest a major contribution. Also, they provide their list of natural variability aspects right after the down-playing statement about the possible low-cloud feedback mentioned above, saying: "However, there are numerous natural climate signals during this period that are associated with atmospheric circulation changes that can influence the distribution of clouds." This shows quite clearly that they want to emphasise the natural variability over the possible low-cloud feedback.

Quote given to Carbon Brief

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 92

MISLEADING

It is not easy to justify a new positive low cloud feedback that began emerging in 2015 since there is no obvious feedback trigger starting at that time.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

A change in the SST pattern has been linked to a decline in low-altitude cloud over some stratocumulus regions (Andrews et al. (2022) and Loeb et al. (2020)) and it is misleading to paint these changes as requiring new feedbacks.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "http://doi.org/10.1029/2019GL086705"](http://doi.org/10.1029/2019GL086705) \h]

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

Page 92

MISLEADING

A change of 1-2% in global cloud cover has a greater radiative impact on the climate than the direct radiative effect of doubling CO₂.

[[HYPERLINK "https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/"](https://research.reading.ac.uk/meteorology/people/richard-allan/) \h], professor of climate science, University of Reading

Short-term interannual fluctuations are unfairly compared with long-term radiative forcing. Also, a decrease in global albedo is an expected consequence of global warming as feedbacks cause ice to melt and some clouds to diminish (e.g. Forster et al. (2021)). This signal in shortwave radiation is seen to a greater extent than in the longwave since decreases in outgoing longwave due to rising greenhouse gases being offset by the increases in outgoing longwave from the resulting higher temperatures that are influenced by the greenhouse gases, but also declining aerosol and feedbacks that amplify the warming through ice melt and cloud responses to warming (e.g. Raghuraman et al. (2024)).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/"](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/) \h]

8.6 Extreme event attribution (EEA)

Page 96

FALSE

The existence of an outlier at the end of a data series poses the problem that estimates of the event probabilities will be biased whether the outlier is included or excluded (Barlow et al. (2020)). Methods to eliminate the bias have not yet been established.

[[HYPERLINK "https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=335613%20https%3A//people.epfl.ch/anthony.davison%3Fla%3Den"](https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=335613%20https%3A//people.epfl.ch/anthony.davison%3Fla%3Den) \h], research scientist, professor of mathematics, ETH Zurich, École Polytechnique Fédérale de Lausanne

The text suggests that the presence of the trigger event at the end can't be dealt with, whereas the argument in Barlow and in our paper is that it can be dealt with (if the selection event is known) with appropriate statistical methods specifically detailed in both papers.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPER
LINK
K
"https
://doi.
org/1
0.1016
/j.wac
e.2023
.10058
4" \h
]
HYPER
LINK
K
"https

://doi.

org/1

0.1111

/rssc.1

2420"

\h]

8.6 Extreme event attribution (EEA)

Page 96

MISLEADING

Methods to eliminate the bias have not yet been established, leading some experts (e.g. Miralles and Davison (2023)) to argue that in settings in which a data series contains a single extreme event at the end, estimation of a return period for the extreme event will be so biased and uncertain that it should be avoided altogether.

[[HYPERLINK "https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=335613%20https%3A//people.epfl.ch/anthony.davison%3Flang%3Den"](https://iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=335613%20https%3A//people.epfl.ch/anthony.davison%3Flang%3Den) \h], research scientist, professor of mathematics, ETH Zurich, École Polytechnique Fédérale de Lausanne

The cited paper does argue that the estimated return period is highly variable and so one should avoid using it, but also states that if it has to be used, one should clearly state its uncertainty. It does not imply that fast weather attribution should not be performed at all.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584"](https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584) \h]

8.6 Extreme event attribution (EEA)

Page 97

MISLEADING

Zeder et al. (2023) also concluded that the methods employed by Philip et al. (2022, the WWA analysis) tend to overstate the rarity of extreme heat waves, leading to a biased perception of the effect of climate change on the heatwave event: “The tendency to overestimate the return period of observed extreme heatwave events may fuel the impression that seemingly impossible heatwave extremes are currently clustering at an unprecedented rate.”

[[HYPERLINK](https://usys.ethz.ch/en/people/profile.MTE5NTkw.TG1zdC82MzcsMzIwMTk3)

"<https://usys.ethz.ch/en/people/profile.MTE5NTkw.TG1zdC82MzcsMzIwMTk3>

MjIy.html" \h], lecturer at the department of environmental systems science, ETH

Zurich

The quote taken from the paper Zeder et al. (2023) led by my (former) PhD student, Joel Zeder, is in itself correct, yet taken completely out of context. Our paper shows indeed that when using relatively short observational timeseries, return level estimates may be systematically underestimated and return periods may be overestimated, which affects the calculation of the risk ratio in attribution studies. We further concluded that the risk of extreme heatwaves could be underestimated in both past and present-day climate and recommend following an approach like Miralles and Davison (2023). This paper applied the recommended approach specifically to the 2021 Pacific north-west heatwave. However, both Miralles and Davison (2023) and Zeder et al. (2023) show that while methodological choices affect the exact estimate of the risk ratio, all estimates show a strong role of long-term warming increasing the probability of the event.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://agu
pubs.
online
librar
y.wile
y.com
/doi/1
0.1029
/2023
GL10
4090"
\\h][
HYPE
RLIN

K
"https
://ww
w.scie
ncedi
rect.c
om/sc
ience/
article
/pii/S
22120
94723
00037
3" \h
]

Part III: Impacts on ecosystems and society

9.1 Econometric analyses

Page 104

FALSE

Bareille and Chakir (2023) assembled a large data base on farm sale prices in France for properties that sold twice between 1996 and 2019. They could

replicate pessimistic results showing negative effects of warming on agricultural land values using conventional econometric modelling.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/)], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

Bareille and Chakir (2023) do reproduce the standard results obtained from “conventional econometric modelling” like the Ricardian approach proposed by Mendelsohn et al. (1994). However, these standard results in no way demonstrate “negative effects of warming on agricultural land values”. Rather, as illustrated in Figure 5 of their study, Bareille and Chakir (2023) closely mimic the outcomes of the Ricardian approach in similar contexts, which points to slightly positive impacts of climate change on farmland values. Such findings are consistent with the broader literature when applied to contexts with moderate climate conditions. Nevertheless, as has been extensively discussed, these results are likely subject to bias arising from omitted variables.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.scie
ncedi
rect.c
om/sc
ience/
article
/abs/p
ii/S00
95069

62300
0402"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.scie
ncedi
rect.c
om/sc
ience/
article
/abs/p
ii/S15
74007
22100
0025"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.jou
rnals.
uchic
ago.e
du/do
i/full/
10.10
93/ree
p/rex
017"
\h]

9.1 Econometric analyses

Page 104

FALSE

But by taking advantage of the repeat sales data, which provides information on site-specific changes in land prices, they found the results reversed and

implied that climate change will be very beneficial for French agriculture.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/) \h], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

Bareille and Chakir (2023) do not identify any negative impacts of climate change on land values; across all methodologies they employ, the evidence consistently points toward positive effects of recent climate trends.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069623000402"](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069623000402) \h]

9.1 Econometric analyses

Page 104

MISLEADING

But by taking advantage of the repeat sales data, which provides information on site-specific changes in land prices, they found the results reversed and implied that climate change will be very beneficial for French agriculture.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/) \h], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

These results are derived from recent climate trends over the period 1990-2020 in the context of French agriculture. While such moderate warming may generate short-term benefits for agriculture, more substantial – and as yet unobserved – warming is likely to result in losses. It is well established that

higher temperatures induced by climate change can produce non-linear effects,

with moderate warming potentially yielding gains, but more pronounced warming leading to detrimental impacts.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.nature.com/articles/nature15725"](https://www.nature.com/articles/nature15725) \h]

9.1 Econometric analyses

Page 104

MISLEADING

But by taking advantage of the repeat sales data, which provides information on site-specific changes in land prices, they found the results reversed and implied that climate change will be very beneficial for French agriculture.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/) \h], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

While such a result may arise in contexts like France (where northern regions remain, for the time being, too cold to cultivate high-value crops), these findings are highly context-specific and cannot be generalised to other settings. This is particularly true for a large and heterogeneous country like the US, where both climatic and agricultural conditions differ substantially from those in France. Bareille and Chakir (2023) provide indirect evidence that the positive impacts of recent climate change on French agriculture identified with their approach are likely driven by vineyard expansion, a phenomenon highly specific to France and not transferable to the US context.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1093/reep/rex017"](https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1093/reep/rex017) \h]

9.1 Econometric analyses

Page 104

MISLEADING

The authors concluded that, taking adaptation into account, a warming climate would yield positive benefits for French agriculture that were between two and 20 times larger than had previously been estimated. On average, with full adaptation, they concluded that climate changes under the medium RCP4.5 scenario could double the value of French farmland by 2100.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/) \h], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

These results are obtained using a novel method, the so-called repeat-Ricardian approach. In contrast to other studies cited in the report – such as Mendelsohn et al. (1994), Deschênes and Greenstone (2007), Schlenker and Roberts (2009) and Burke and Emerick (2016) – this approach has not yet been replicated in other contexts. Its findings should therefore be interpreted with caution. By comparison, dozens of replications and extensions of Deschênes and Greenstone (2007), Schlenker and Roberts (2009) and Burke and Emerick (2016) consistently document negative impacts of climate change on crop productivity in the US, but also worldwide.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.nature.com/articles/s41586-025-09085-w"](https://www.nature.com/articles/s41586-025-09085-w) \h]

9.1 Econometric analyses

Page 105

MISLEADING

A major deficiency of all these studies, however, is that they omit the role of CO₂ fertilisation. Climate change as it relates to this report is caused by GHG emissions, chiefly CO₂. The econometric analyses referenced above focus only on temperature and precipitation changes and do not take account of the beneficial growth effect of the additional CO₂ that drives them.

[[HYPERLINK "https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/"](https://psae-saclay.fr/en/membres-de-lunite/francois-bareilleinrae-fr/) \h], researcher in economics, INRAE & University Paris-Saclay

All of these studies implicitly account for the effects of CO₂ fertilisation on agriculture insofar as local CO₂ concentrations are correlated with changes in temperature and precipitation. Moreover, Hultgren et al. (2025) show that the positive effects of CO₂ fertilisation only partially offset the negative impacts of anthropogenic climate change on crop yields arising from changes in temperature and precipitation.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.nature.com/articles/s41586-025-09085-w"](https://www.nature.com/articles/s41586-025-09085-w) \h]

9.2 Field and laboratory studies of CO₂ enrichment

MISLEADING

One of the ways the effect of CO₂ on crop growth has been studied is through “free air enrichment experiments” or FACE plots, in which small sources of CO₂ are placed in fields surrounding plants and the growth response to elevated CO₂ under varying weather conditions are recorded. Ainsworth et al. (2020) summarises results from about 250 such studies. They found that elevation of CO₂ by 200ppm caused an average 18% increase in crop yield in C₃ plants. C₄ plants exhibited benefits mainly under drought conditions.

[[HYPERLINK "https://lab.igb.illinois.edu/long/"](https://lab.igb.illinois.edu/long/) \h], Ikenberry Endowed University Chair, University of Illinois

While this report is correct in saying that, in isolation, our research has shown that an increase in CO₂ does (on average for C₃ crops) results in increased yields and decreased quality, and that it can increase water use efficiency. But when account is taken of the accompanying changes in tropospheric ozone, temperature, atmospheric water vapor pressure deficit and extreme drought, heat and flooding events then the overall effect of GHG driven climate and atmospheric change is strongly negative.

Quote given to Carbon Brief

9.3 Crop modeling meta-analyses

Page 107

MISLEADING

McKittrick (2025) re-examined the Moore et al. database and found that, while it claimed to cover 1,722 studies, only half the entries (N=862) had complete

records, so that the sample available for regression analysis was much smaller than both studies indicated. McKittrick noted that the records most commonly missing were the changes in ambient CO2 and found that in many cases these could be recovered from the underlying studies or the original climate scenario tables, thereby increasing the usable sample size by 40%. The crop yield projections incorporating the newly available data changed considerably. As shown in Figure 9.2, whereas the partial data set implied warming would decrease yield (blue lines), the complete data set implied constant or increase global yields, even out to 5C warming (green lines).

[[HYPERLINK "https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/"](https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/) \h], lead author, IPCC AR6 WG2

Regression analysis of historical climate impacts on crop yield do not capture the impact of non-linear processes, such as effects of extreme heat stress occurring at crop anthesis. Hence the conclusion based on a single approach is misleading (Moore et al. (2017) and McKittrick (2025)). The IPCC assessed a range of peer-reviewed publications based on regression analysis and process-based models, also including the CO2 fertilisation effects (for example, see AR6 WG2, chapter 14, p1,956, for synthesis on US agriculture).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-14/"](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-14/) \h]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 107

MISLEADING

Evidence has shown that CO₂-induced biomass gains are sometimes accompanied by reductions in the concentrations of protein and other key nutrients such as iron and zinc (Ebi et al. 2021)."

[[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html"](https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html) \h
], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental
engineering

All plants absorb carbon dioxide from the atmosphere, using photosynthetic pathways to break down that carbon dioxide into carbon and oxygen, and then using the carbon to grow. Eighty-five percent of plants use a photosynthetic pathway that, based on biochemical characteristics, is termed C₃; these C₃ plants include important crops such as wheat, rice, barley, oats, rye, soybean and potatoes. Field experiments with wheat and rice under a doubling of CO₂ from pre-industrial concentrations demonstrate that protein declines by about 10%, B-vitamins by as much as 30% and micronutrients by about 5% (see Ebi et al. (2021) and associated references). Wheat and rice each provide about 20% of calories consumed worldwide, with wide regional variability (Awika (2011) and Shiferaw et al. (2013)). Corn, sorghum and millet use a different photosynthetic pathway (C₄) and are not expected to experience declines in nutrient density with higher CO₂ concentrations. The DoE CWG report conflates these two photosynthetic pathways into "sometimes" without being clear that declines in nutrient density are consistently seen under elevated CO₂ for C₃ crops (Loladze (2002) and (2014); Loladze et al. (2019); Myers et al. (2014); Taub et al. (2008); J. Wang et al. (2019) and (2020); and Zhu et al. (2018)), which are widely consumed in the US.

The DoE CWG report also ignores a key fact raised in Ebi et al. (2021) that

elevated CO2 and elevated temperature can increase toxins such as arsenic and cadmium in crops (Dhar et al. (2020); Farhat et al. (2021) and (2023); Guo et al. (2011); Muehe et al. (2019); J. Wang et al. (2019); Y. Wang et al. (2023); and Yuan et al. (2021)), not just dilute nutrients. Ingestion of toxins in food results in illness, shortened life span, reduced quality of life and death (Gibb et al. (2019)).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.108

8/174

8-

9326/

abfcfa

" \h]

[

HYPE

RLIN

K

"https

://pub

s.acs.

org/d

oi/full

/10.10

21/bk

-2011-

1089.c

h001"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.100

7/s12

571-

013-

0263-

y" \h

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.101

6/S01

69-

5347(

02)02

587-9"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.755

4/eLif

e.0224

5" \h

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.100

2/mnf

r.2018

01047

" \h]

[
HYPE
RLIN
K

"https
://doi.
org/1
0.103
8/nat
ure13
179"
\h]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 107

MISLEADING

Some experiments have shown that the rising temperatures expected to accompany higher CO2 levels will offset this loss (Köhler et al. (2019)) although the evidence for this is mixed, as is the evidence that nutrient dilution observed to date is entirely attributable to higher CO2 (Ziska (2022)).

[HYPERLINK."https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html" \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

Some experiments have shown that rising temperatures expected to accompany higher CO₂ levels can offset nutritional losses (Köhler et al. (2019) and, while the DoE CWG report acknowledges that evidence for this temperature compensation is mixed, it fails to cite studies that found partial or no compensation in nutritional density when elevated CO₂ was crossed with elevated temperature (e.g., Jayawardena et al. (2021); J. Wang et al. (2019); Wei et al. (2021); and Ziska et al. (1997)). On the flip side of crop nutritional quality, increased temperatures are expected to increase toxin levels in crops. Wang et al. (2020) found that while warmer temperatures moderately mitigated the loss of nutrients associated with elevated CO₂, the warmer temperatures simultaneously increased manganese, molybdenum, chromium, nickel, cadmium and lead concentrations in rice and wheat. A study investigating arsenic contamination of rice found that grain arsenic concentrations were more elevated when elevated CO₂ was combined with elevated temperature than when either elevated CO₂ or elevated temperature operated alone (Muehe et al. (2019)).

The second half of the statement above (i.e., "... as is the evidence that nutrient dilution observed to date is entirely attributable to higher CO₂") draws an incorrect conclusion from Ziska (2022). Ziska (2022) presents a figure (Figure 1) that shows newer breeding lines of spring wheat have less percent protein, but that all the breeding lines have experienced declines in percent protein over the 20th century. Thus, Ziska (2022) acknowledges that breeding can change nutritional density but ultimately concludes that "[CO₂] is directly affecting protein concentration separate from breeding history".

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.111
1/tpj.1
4166"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.109
3/aob
pla/pl
ab031
" \h]
[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.111
1/nph
.1566
1" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.100
2/jsfa.
11021

" \h]

[
HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.213

4/agr

onj19

97.00

02196

20089

00010

007x"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.101

6/j.fcr.

2020.

10775

3" \h

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.103

8/s41

467-

019-

12946

-4" \h

]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 107

MISLEADING

If nutrient dilution does occur under rising CO2 levels, there are several adaptive strategies that could be pursued. First, selective breeding to raise micronutrient content is already established (Saltzman et al. (2017)) and has proven to be a cost-effective agronomic strategy (Ebi et al. (2021)).

[[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html"](https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html) \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

Biofortification via selective breeding has been used successfully to raise the zinc, iron and vitamin A content of crops, per Saltzman et al. (2017). However, this approach is not a “proven” agronomic strategy, cost-effective or otherwise, for addressing simultaneous nutrient dilution by elevated CO2. Ebi et al. (2021) specifically stated: “An additional challenge for biofortification is the tendency of rising CO2 concentrations to diminish the concentrations of multiple nutrients concomitantly (Loladze (2014a) and (2014b)) in contrast to biofortification that targets only one or a few selected nutrients.” Further,

biofortification cannot address the issue of increased toxin levels in crops associated with elevated CO2 and CO2-induced warming.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.111

1/nya

s.1331

4" \h

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.108

8/174

8-

9326/

abfcfa

" \h]

[

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.755

4/eLif

e.0224

5" \h

]

References

Page 108

FALSE

*Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO2 concentrations on crop water productivity. Nature Climate Change 6, 786–790 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>*

[[HYPERLINK "https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/"](https://www.iri-thesys.org/people-pages/delphine-deryng-dr/) \h], lead author, IPCC AR6 WG2

The date of the citation is incorrect, and I didn't find reference to this paper in the text of the chapter

Quote given to Carbon Brief

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 108

MISLEADING

Optimal strategies will be location-specific because they vary by crop, climate and soil type (Ebi et al. (2021)).

[[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html"](https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html) \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

Developing new cultivars requires significant investments and generally take years (see CGIAR programmes). Such programmes will not be developed locally, nor will the investment make sense if the developed cultivar only applies to a specific location.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.cgiar.org/"](https://www.cgiar.org/) \h]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 108

MISLEADING

Second, fortification of food products with micronutrients is already routine. Folic acid (a B vitamin) is added to flour and many other foods; iodine is added to table salt, most commercial breakfast cereals are fortified with iron and numerous vitamins, etc. Third, dietary supplements in the form of multivitamin tablets are inexpensive, widely-available and routinely consumed.

[HYPERLINK."https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html" \h
], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and envrionmental
engineering

Fortification and dietary supplements do not currently alleviate nutrient deficiencies; therefore, it is unlikely that such approaches will alleviate nutrient deficiencies in the future, particularly if they are exacerbated by lower crop nutrient density. For example, 30% of women and girls worldwide (15-49 years) currently have iron-deficiency anemia (World Health Organization, 2025), including nearly 40% of women and girls (12-21 years) in the US (Weyand et al. (2023)). These deficiencies exist despite decades of dietary supplement availability (Macdougall (2017)). The DoE CWG report ignores that high CO2 concentrations affect a wide range of macro and micronutrients beyond iron and zinc, such as lithium (for mental health), magnesium (for muscle and nerve function, blood pressure regulation, bone health and energy production) and others (Loladze (2014)). Dietary supplements do not address these critical contributions to hidden hunger (Wallace et al. (2014)). US government guidelines emphasise that supplements are not an adequate substitute for a nutrient dense diet (US Department of Agriculture and US Department of Health and Human Services (2010)). Further, fortification of food or use of supplements will not address the health risk posed by increased toxin concentrations in grain associated with elevated CO2 and CO2-induced warming.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN

K
"https
://ww
w.wh
o.int/
data/
gho/d
ata/th
emes/
topics
/anae
mia_i
n_wo
men_
and_c
hildre
n" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.100
1/jam
a.202
3.802
0" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.118
2/blo
od.V1
30.Su
ppl_1
.SCI-
43.SC
I-43"
\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.755

4/eLif

e.0224

5" \h

]

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.1080
/0731
5724.2
013.84
6806"
\\h][
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.die
taryg
uideli
nes.g
ov/sit
es/def
ault/fi
les/20
19-
05/Di
etary
Guide
lines2
010.p
df" \\h
]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 108

MISLEADING

One concern about reliance on adaptive strategies is whether they are feasible

in low-income countries. Micronutrient deficiency is already a problem in the developing world and dietary supplements have proven to be an effective low-cost response (Ebi et al. (2021)).

[[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html"](https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html) \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

As noted in the previous comment, micronutrient deficiency is a health problem in developing and developed countries; dietary supplements have not solved the problem. Micronutrient deficiency is expected to increase with elevated CO₂ (Beach et al. (2019); Smith and Myers (2019); Weyant et al. (2018); and Zhu et al. (2018)). As supplements have been unable to fully address the current deficiencies in micronutrients, it is unlikely they will successfully ameliorate a future increased health burden caused by nutrient dilution in crops. In addition, as noted in the previous comment, supplements will not address the health issues posed by increased toxin concentrations in grain expected with elevated CO₂ and CO₂-induced warming.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.101
6/S25
42-
5196(
19)30
094-4"
\h] [
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.102
9/201
9GH0
00188
" \h]
[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1
0.137
1/jour
nal.p
med.1
00258
6" \h
] [
HYPE
RLIN
K
"https

://doi.
org/1
0.112
6/scia
dv.aa
q1012
" \h]

9.4 CO₂ fertilization and nutrient loss

Page 108

MISLEADING

It should also be noted the IPCC emission scenarios that generate high levels of warming also involve strong income growth. The SSP scenarios assume that, compared to 2005 levels, global per capita income will double by 2100 in the lowest growth case (SSP3), and in the highest emission case (SSP5) global per-capita income will grow nearly 16-fold. In that scenario even the poorest regions (Africa and the Middle East) end up with a per capita income of about US\$126,000, 70% higher than current US per capita income (about US\$75,000). Consequently the same scenarios in which CO₂ levels increase the most are also those in which global poverty is largely eliminated, in which case all countries would be able to afford dietary supplements as necessary to address micronutrient deficiencies, if they arise and cannot be addressed using on-farm agricultural strategies.

[[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html"](https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html) \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

The US is one of the wealthier countries in the world, yet many US citizens

suffer from micronutrient deficiencies. Wallace et al. (2014) used data from the

National Health and Nutrition Examination Survey (2007-10) to determine that despite the fact that 51% of Americans consume multivitamin/mineral supplements with greater than nine micronutrients, many fail to meet the estimated average requirement for vitamin A (35%), vitamin C (31%), vitamin D (74%), vitamin E (67%), vitamin K (77%), calcium (39%), magnesium (46%), potassium (100%) and choline (92%). Bird et al. (2017) concluded that “nearly one-third of the US population is at risk of deficiency in at least one vitamin, or has anemia”.

Growth and development of children and lifespan health depends on adequate intake of micronutrients. Decreasing the nutrient density of diets through continued emissions of CO₂ will exacerbate the situation, even with any associated income growth. Ingestion of toxins in food is a global problem that affects the health of millions of people, including those living in wealthy countries (Consumer Reports (2012) and (2014); and Gibb et al. (2019)). A growth in income will not offset the health risk posed by contaminated food. It is expected that this health risk will grow as elevated CO₂ and CO₂-induced warming increase the toxin content of crops (Dhar et al. (2020); Farhat et al. (2021) and (2023); Guo et al. (2011); Muehe et al. (2019); J. Wang et al. (2019); Y. Wang et al. (2023); and Yuan et al. (2021).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.
org/1

0.108

0/073

15724

.2013.

84680

6" \h

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://ww

w.con

sume

rrepo

rts.or

g/cro/

maga

zine/2

012/1

1/arise

nic-

in-

your-

food/i

ndex.

htm"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.101

6/j.en

vres.2

018.1

2.062"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.339

0/agri

cultur

e1007

0289"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.101

6/j.sci

toten

v.202

0.143

049"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.102

1/es20

01584

" \h]

[HYPERLINK "https://doi.org/10.1038/s41467-019-12946-4" \h]

9.4 CO2 fertilization and nutrient loss

Page 108

MISLEADING

In summary, there is abundant evidence going back decades that rising CO2 levels benefit plants, including agricultural crops, and that CO2-induced warming will be a net benefit to US agriculture. To the extent nutrient dilution occurs there are mitigating strategies available that will need to be researched and adapted to local conditions.

[HYPERLINK "https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html" \h], and Dr Becca Neumann, associate professor of civil and environmental engineering

There is abundant evidence that under ideal conditions (i.e., adequate nutrients and water and optimal temperatures), crop productivity increases with rising CO2 levels (e.g., Ainsworth & Long (2020)). These increases diminish or disappear when conditions are non-ideal (i.e., nutrients are limited, water and temperatures are sub-optimal). As CO2 concentrations increase, ambient temperatures will continue warming and weather patterns will shift, altering water and nutrient availability. It is not clear that boosts in productivity generated by elevated CO2 will compensate for the damage to plant productivity caused by these other stressors. In many parts of the world, even with adaptation, crop yields are expected to decline (Hultgren et al. (2025)). Further, discussed in the comments above, elevated CO2 is associated with

declining nutrient density in crops. Therefore, it is disingenuous to state that

there is “abundant evidence going back decades that rising CO2 levels benefit plants”. This statement cherry-picks the productivity boost to plants associated with rising CO2 levels while ignoring the negative human health outcomes that will co-occur. The scientific consensus is that CO2-induced warming will be harmful to US agriculture, leading to yield declines (Hu et al. (2024); Hultgren et al. (2025); Lobell et al. (2011); Lobell and Field (2007); and Zhao et al. (2017)). Physiological studies of crops show there is an optimal temperature at which yields maximise. When temperatures are below or above this optimal point, yields decline.

Further, as outlined in the comments to Section 9.4 above, CO2-induced warming is associated with increased toxin levels in crops. It is factually inaccurate to state that “CO2-induced warming will be a net benefit to US agriculture”. There are strategies, such as biofortification and supplementation, that can be employed to help mitigate nutrient dilution in crops, as discussed in Ebi et al. (2020). However, as outlined in the comments above, these approaches currently do not address nutrient deficiencies and therefore it is unrealistic to expect that they will be able to address future nutrient deficiencies exacerbated by rising CO2 levels and crop nutrient density. Further, these strategies will not solve the problem of increased concentrations of toxins in crops associated with increased CO2 and/or CO2-induced warming.

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://doi.

] [

HYPE

RLIN

K

"https

://doi.

org/1

0.108

8/174

8-

9326/

2/1/01

4002"

\h]

[Link6](#)

[HYPERLINK "https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfcfa" \h]

10.3 Mortality from temperature extremes

Pages 122-124

MISLEADING

Section 10.3.1

[HYPERLINK "https://www.lshtm.ac.uk/aboutus/people/gasparrini.antonio" \h], biostatistician and epidemiologist, London School of Hygiene & Tropical Medicine

In relation to my area of research, the report cites two articles (Gasparrini (2015) and Zhao (2021)) in support of the statement that cold-related mortality far exceeds heat-related mortality in most of the regions. While true, this says little about the impact of climate change on temperature-related deaths. In fact, the focus should be on the respective (and opposite) change in the heat and cold contributions, not their absolute values. In this respect, there is some evidence that the expected reduction in cold-related mortality will not offset the increase in heat-related mortality, in particular under more extreme climate change scenarios (Gasparrini (2017) and Masselot (2025)). More importantly, the level of adaptation to heat required to offset such a positive net effect should be very high, in the order of 90% reduction (Masselot (2025)).

Quote given to Carbon Brief

Supporting evidence

[

Link6

HYPE

RLIN

K

"http:

//ww

w.ncb

i.nlm.

nih.g

ov/pu

bmed

/2600

3380"

\h] [

HYPE

RLIN

K

"https

://pub

med.

ncbi.n

lm.ni

h.gov

/3424

5712/"

\h]

[[HYPERLINK "https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39870815/" \h](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39870815/)]

11 Climate change, the economy, and the social cost of carbon

Page 116

FALSE

An influential study in 2012 suggested that global warming would harm growth in poor countries, but the finding has subsequently been found not to be robust. Studies that take full account of modelling uncertainties either find no evidence of a negative effect on global growth from CO2 emissions or find poor countries as likely to benefit as rich countries.

[[HYPERLINK "https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol" \h](https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol)], professor at the department of economics, University of Sussex

“The second sentence is wrong. The authors refer to “studies”, but without references. Tol (2024) finds that the then-available studies jointly point to a negative impact of climate change on global economic growth. My less systematic reading of the literature since has not led me to change my mind. Their conclusion that ‘poor countries’ are ‘likely to benefit’ is again not backed up with references. Tol (2024), the only reference in the paragraph, concludes the opposite.”

Quote from [[HYPERLINK "https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous" \h](https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous)]

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523005074" \h](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523005074)]

11.1 Climate change and economic growth

MISLEADING

Nor have past extreme weather events had a significant effect on US banks' performance (Blickle et al. (2021)); warming has even been shown to be beneficial for the finance and insurance sector (Mohaddes et al. (2023)).

[[HYPERLINK "https://www.jbs.cam.ac.uk/people/kamiar-mohaddes/" \h](https://www.jbs.cam.ac.uk/people/kamiar-mohaddes/)],
deputy director of the Cambridge executive MBA programme,
University of Cambridge

“The way our findings have been presented is misleading...Investigating the long-term macroeconomic effects of climate change across 48 US states, we provide evidence for the damage that climate change causes in the US using various economic indicators at the state level: growth rates of Gross State Product (GSP), GSP per capita (income), labour productivity and employment as well as output growth in 10 economic sectors (e.g. agriculture, manufacturing, services, retail and wholesale trade). Just to be clear, (1) these are not ‘small negative effects’ and (2) we do indeed show that climate change has negative effects on income in the US. We show that while [hashtag#weather](#) shocks have level effects (or temporary growth impacts), climate change – by shifting the long-term average and variability of weather – impacts the US economy’s ability to grow in the long term! We study economic activity in all sectors of the US economy –agriculture, forestry & fisheries; mining, construction, manufacturing, transport, communications and public utilities, wholesale trade, retail trade, financial services & property, services and government –and find that the impact of climate change on sectoral output growth is broad based – each of the 10 sectors considered is affected by at least one of the four climate

variables.”

Quote from [external source](#)

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://academic.oup.com/ooec/article/doi/10.1093/ooec/odac010/6824397?login=false"](https://academic.oup.com/ooec/article/doi/10.1093/ooec/odac010/6824397?login=false) \h]

11.2 Models of the social cost of carbon

Page 121

MISLEADING

Economists use IAMs to compute the SCC. Two of the best-known are the Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (“FUND”, Tol 1997) and Nordhaus’ DICE. EPA (2023) introduced new ones for its recent work. IAMs embed a “damage function” or set of functions relating ambient temperature to local economic conditions. The assumptions embedded in the damage function will largely determine the resulting SCC. IAMs also assume a long-term discount rate or, as in DICE, compute the optimal internal discount rate as part of the solution.

[[HYPERLINK "https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol"](https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol) \h], professor at the department of economics, University of Sussex

“The literature is vast. I counted 446 papers with estimates. There are numerous commentaries; and two handfuls of meta-analyses (e.g. Tol (2023) and Moore et al. (2024)). Instead, the authors wrote their own review, which omits the most influential papers and misses key insights. Cherry-picking may be a better term than review.”

Quote from [[HYPERLINK "https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous"](https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous) \h]

Supporting evidence

[
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.nat
ure.co
m/arti
cles/s
41558
-023-
01680
-x" \h
][
HYPE
RLIN
K
"https
://ww
w.pna
s.org/
doi/10
.1073/
pnas.
24107
33121
" \h]

11.2 Models of the social cost of carbon

Page 123

FALSE

Tol (2017) estimates that the private benefit of carbon is large relative to the social cost.

[[HYPERLINK "https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol" \h](https://profiles.sussex.ac.uk/p289812-richard-tol)], professor at the department of economics, University of Sussex

“This paper was never published in a peer-reviewed journal and is therefore not admissible by the rules of the US government. The paper was peer-reviewed and rejected, because my private benefit [of carbon] is an average, whereas the social cost is a marginal. The two cannot be compared (unless you make a ridiculous assumption about linearity). I still hope to fix the paper one day. As it stands, however, the comparison is wrong.”

Quote from [[HYPERLINK "https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous" \h](https://richardtol.substack.com/p/is-climate-change-dangerous)]

Supporting evidence

[[HYPERLINK "https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html" \h](https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html)]

Glossary

IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change, the UN body for assessing the science related to climate change. IPCC works in five-to-eight year cycles and comprises three working groups of scientists, each focusing on different aspects of climate science and the response to climate change. Each assessment cycle, scientists appointed by the IPCC produce three reports summarising the latest climate science, as well as “special reports” and a synthesis report, which serve as key inputs to international climate negotiations.

WG1/2/3: The three working groups of the IPCC. Working Group I (WG1) deals with the physical science basis of climate change, Working Group II (WG2) with climate change impacts, adaptation and vulnerability and Working Group III (WG3) with mitigation of climate change.

AR6: The [[HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/carbon-briefs-definitive-guide-to-the-entire-ipcc-sixth-assessment-cycle/" \h](https://www.carbonbrief.org/carbon-briefs-definitive-guide-to-the-entire-ipcc-sixth-assessment-cycle/)] of the IPCC, which was published in 2013-14.

AR5: The [[\] of the IPCC, which was published in 2013-14.](https://www.carbonbrief.org/carbon-briefs-guide-to-the-intergovernmental-panel-on-climate-changes-fifth-assessment-report/)

CMIP5/6: The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) is the international modelling effort that feeds into the IPCC's influential assessments. CMIP5 was developed for AR5, while [[\] was developed for AR6.](https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/)

Methodology

The DoE report references around 350 sources. Of these, around 240 are peer-reviewed research papers. Other sources include books, commentary articles

and letters published in journals, as well as “[[HYPERLINK](https://library.leeds.ac.uk/info/1110/resource-guides/7/grey-literature) "https://library.leeds.ac.uk/info/1110/resource-guides/7/grey-literature" \h]” literature, such as study preprints, blog posts, news articles and government websites.

For this factcheck, Carbon Brief emailed the corresponding authors of all 240 peer-reviewed studies. If the corresponding author did not respond or the email address bounced, Carbon Brief contacted another report author – typically the lead author, if separate to the corresponding author.

In 20 cases, the corresponding author was also an author on the DoE report itself. These authors were not invited to factcheck their own work.

Carbon Brief asked the corresponding authors to read the section of the report that cites their work and to identify if it uses their work to make “misleading” or “false” statements.

False was described as “statements/statistics that are factually incorrect or untrue”.

Misleading was described as “statements/statistics that are presented in a way that distort the meaning, create a false impression or omit/cherry-pick crucial details”.

(Carbon Brief also invited various topic experts to contribute their responses. Respondents were also invited to forward Carbon Brief’s request to other experts.)

Carbon Brief's factcheck also includes comments from scientists who have already reacted to the DoE report in public, via media articles, social media or

blog posts. Links to these sources are included with the relevant responses.

Carbon Brief ensured that any scientists contributing to the factcheck in an anonymous capacity have the appropriate expertise to comment on the sections of the report that they factchecked.

Any pages with “misleading” and “false” statements are shown in orange and red, respectively, in the main graphic. Pages that are not coloured are either accurate, or have not yet been factchecked.

There has been some [[HYPERLINK](#)

["https://bsky.app/profile/climateofgavin.bsky.social/post/3lvedvwuj422b"](https://bsky.app/profile/climateofgavin.bsky.social/post/3lvedvwuj422b) \h] that artificial-intelligence tools might have been used to generate some parts of the report, particularly the citations, due to some “hallucinatory”-type mistakes. For example, a [[HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/"](https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/) \h] [[HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/"](https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/) \h] is cited, but the credited author is mistakenly listed as another Carbon Brief journalist.

However, Carbon Brief ran samples of the report’s main text through several AI text checker tools and found there is a “very low probability” they were generated using AI. It was not possible to do similar checks of the report’s citations.

Carbon Brief invites any scientists who notice further errors in the report to email [[HYPERLINK "mailto:info@carbonbrief.org"](mailto:info@carbonbrief.org) \h].

SECTIONS

ABOUT

SOCIAL

[
HYPERLI
NK
"https://w
ww.carbo
nbrief.org
/category/
science/"
\h]

[
HYPE
RLIN
K
"https:
//ww
w.carb
onbrie
f.org/a
bout-
us/"
\h]

[
HYPERLIN
K
"https://twit
ter.com/Car
bonBrief"
\h]

Published under a [	[	\h] [	NK
HYPERLINK			
"https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode" \h].	HYPE	HYP	"https://ww
You are welcome to reproduce	RLIN	ERLI	w.carbonbri
unadapted material in full for	K	NK	ef.org/cropp
non-commercial use, credited	"https	"http	ed/" \h]
'Carbon Brief' with a link to the	://ww	s://w	
article. Please contact us for	w.car	ww.c	
commercial use.	bonbr	arbon	
	ief.org	brief.	
	/categ	org/c	
	ory/e	atego	
	nergy	ry/in-	
/ " \h]		focus	
[		/ " \h	
HYPE		]	
RLIN		[	
K		HYPERLI	
"https		NK	
://ww		"https://w	
w.car		ww.carbo	
bonbr		nbrief.org/	
ief.org		china-	
/categ		briefing/"	
ory/p		\h] [	
olicy/"		HYPERLI	

[HYPERLINK	[	HYP	UjRpJz
"https://www.carbonbrie	HYPE	ERLI	vga5Tg
f.org/contact-us/" \h] [	RLIN	NK	" \h]
HYPERLINK	K	"https	
"https://www.carbonbrie	"https:	://ww	
f.org/newsletter-sign-	//ww	w.ins	
up/" \h] [HYPERLINK	w.link	tagra	
"https://www.carbonbrie	edin.c	m.co	
f.org/privacy/" \h] [	om/co	m/car	
HYPERLINK	mpan	bonbr	
"https://www.carbonbrie	y/carb	ief"	
f.org/cookies/" \h] [	on-	\h] [	
HYPERLINK	brief/"	HYP	
"https://www.carbonbrie	\h] [	ERLI	
f.org/comments-policy/"	HYPE	NK	
\h] [HYPERLINK	RLIN	"https	
"https://www.carbonbrie	K	://ww	
f.org/comments-policy/"	"https:	w.yo	
\h]	//ww	utube	
	w.face	.com/	
	book.c	chan	
	om/ca	nel/U	
	rbonb	CiXg	
	rief"	vmQ	
	\h] [	2jUg	

Published by Carbon Brief Ltd © 2025 - Company No. 07222041

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 2:00 PM
To: 'Judith Curry'; 'John Christy'
Cc: 'Ross McKittrick'; 'Roy W. Spencer'
Subject: RE: Carbon brief
Attachments: image001.jpg

I expect a lot of this will be easy to respond to. Here's the first comment (I've not read beyond it) and a tentative response:

MISLEADING

The growing amount of CO2 in the atmosphere directly influences the Earth system by promoting plant growth (global greening), thereby enhancing agricultural yields, and by neutralising ocean alkalinity.

Anonymous

This ignores other effects of rising CO2 concentrations, i.e.: on climate. It is also failing to mention that increased CO2 can reduce the nutrient density of some crops.

Response: The report does not ignore the other effects of rising CO2 concentrations – in fact, the great bulk of the report is concerned with exactly that. And the report does mention the possible reduction in nutrient density (insert citation to the CWG report page)

[The criticism is rather silly. It could equally be leveled at the statement "CO2 is changing the climate" because it omits the fact that CO2 enhances plant growth.]

SEK

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 1:47 PM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: Carbon brief

Well there is a lot of meat in these comments, but most are claims of "misleading" by authors who wanted to make a different point. But worth going through carefully

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:42 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

My, that's a clever way to present the results. I suppose we can look at them as "public comments" and address as needed.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:33 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)

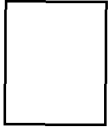
Not clear what angle they will take on their report

On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence-and-impacts#sectionCommittee>

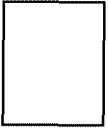
Steven Koonin

--



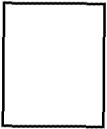
Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: John Christy [climateman60@gmail.com]
Sent: 8/14/2025 5:59:27 PM
To: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
CC: Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]
Subject: Re: Carbon brief

It would be a new approach to identify "Carbon Brief Author" as a source of public comments and directly address them. They want to do science in the press, we want to do science in an organized, dispassionate manner.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:56 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

I tried to make a .doc file out of the carbon brief thing, but i could only get this crazy 5 column illegible thing. If no one else can figure this out, i can do a tedious cut and paste of a pdf into .doc

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:42 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

My, that's a clever way to present the results. I suppose we can look at them as "public comments" and address as needed.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:33 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>

Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM

To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>

Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>

Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)

Not clear what angle they will take on their report

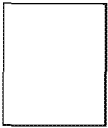
On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence->

and-impacts#sectionCommittee

Steven Koonin

--



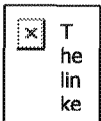
Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 1:56 PM
To: John Christy
Cc: Steven Koonin; Ross McKittrick; Roy W. Spencer
Subject: Re: Carbon brief

I tried to make a .doc file out of the carbon brief thing, but i could only get this crazy 5 column illegible thing. If no one else can figure this out, i can do a tedious cut and paste of a pdf into .doc

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:42 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

My, that's a clever way to present the results. I suppose we can look at them as "public comments" and address as needed.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:33 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)

Not clear what angle they will take on their report

On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence-and-impacts#sectionCommittee>

Steven Koonin

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
Sent: 8/14/2025 5:47:24 PM
To: John Christy [climateman60@gmail.com]
CC: Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]
Subject: Re: Carbon brief

Well there is a lot of meat in these comments, but most are claims of "misleading" by authors who wanted to make a different point. But worth going through carefully

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:42 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:
My, that's a clever way to present the results. I suppose we can look at them as "public comments" and address as needed.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:33 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doc-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)
Not clear what angle they will take on their report

On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence-and-impacts#sectionCommittee>

Steven Koonin

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 1:42 PM
To: Judith Curry
Cc: Steven Koonin; Ross McKittrick; Roy W. Spencer
Subject: Re: Carbon brief

My, that's a clever way to present the results. I suppose we can look at them as "public comments" and address as needed.

John C.

On Thu, Aug 14, 2025 at 12:33 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doe-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)

Not clear what angle they will take on their report

On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence-and-impacts#sectionCommittee>

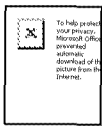
Steven Koonin

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
Sent: 8/14/2025 5:32:54 PM
To: Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]
CC: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]; John Christy [climateman60@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]
Subject: Carbon brief

carbon brief fact check is now up

<https://interactive.carbonbrief.org/doi-factcheck/index.html>

On Thu, Aug 14, 2025 at 10:26 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Looking now myself at the bios, I expect the focus will be impacts on public health and on ecosystems. As Judy notes, only 3 with backgrounds that would let them look critically at physical climate science.

Health impacts of local pollutants are obvious; of CO2-induced temperature rise, not so much.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 10:57 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: NAS committee membership posted

i read the bios, very much focused on energy and the environment (only 3 climate scientists)
Not clear what angle they will take on their report

On Thu, Aug 14, 2025 at 7:20 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

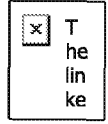
<https://www.nationalacademies.org/our-work/anthropogenic-greenhouse-gases-and-us-climate-evidence-and-impacts#sectionCommittee>

Steven Koonin

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:51 PM
To: 'Ison, Jeremy T.'; 'Woods, Andrea'; 'Josh Loucks'; 'Park, Charles'
Cc: 'John Christy'; 'Ross McKittrick'; 'Judith Curry'; 'Roy W. Spencer'
Subject: RE: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

That's good. Expect some LLM might be a help. For example, "Claude, is there anything obscene or otherwise objectionable in these comments?"

And can we get the pre-release reviews posted on the DOE Climate page. Along with some text like "The report underwent peer review before release. Reviewer comments and the authors' responses are here."

From: Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:47 PM
To: Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>; Park, Charles <charles.park@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climatemanager60@gmail.com>; 'Ross McKittrick' <ross.mckittrick@gmail.com>; 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>; 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

All,

I'm in the process of getting an account set up in order to conduct these reviews, which should be done by tomorrow.

Thank you,
Jeremy

From: Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:35 PM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>; Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>; Park, Charles <charles.park@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climatemanager60@gmail.com>; 'Ross McKittrick' <ross.mckittrick@gmail.com>; 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>; 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

Hi Steve,

The public comments have to go through a review to ensure they are appropriate and able to be posted publicly. I'm told this is a standard process for all DOE public comment periods. Looping in Charles Park to see if GC has an idea of when the 109 comments will be available.

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Date: Thursday, August 7, 2025 at 4:27 PM
To: 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>, Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>, Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climateman60@gmail.com>, 'Ross McKittrick' <ross.mckitrick@gmail.com>, 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>, 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

DOE Team:

It would be good to post the following as soon as possible:

- ? The expert reviews and our responses that took place before the CWG report was released. We should also post the version of the report that those reviewers were commenting on.
- ? The public comments on the Federal Register portal. It currently shows 109 comments received, yet none are visible.

Putting these materials online at this early post-release time would signal our willingness to promote dialog and respond to criticisms.

Steve Koonin

This message does not originate from a known Department of Energy email system.
Use caution if this message contains attachments, links or requests for information.

From: Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:47 PM
To: Woods, Andrea; Steven Koonin; 'Josh Loucks'; Park, Charles
Cc: 'John Christy'; 'Ross McKitrick'; 'Judith Curry'; 'Roy W. Spencer'
Subject: Re: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

All,

I'm in the process of getting an account set up in order to conduct these reviews, which should be done by tomorrow.

Thank you,
Jeremy

From: Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:35 PM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>; Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>; Park, Charles <charles.park@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climatemanager60@gmail.com>; 'Ross McKitrick' <ross.mckitrick@gmail.com>; 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>; 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

Hi Steve,

The public comments have to go through a review to ensure they are appropriate and able to be posted publicly. I'm told this is a standard process for all DOE public comment periods. Looping in Charles Park to see if GC has an idea of when the 109 comments will be available.

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Date: Thursday, August 7, 2025 at 4:27 PM
To: 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>, Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>, Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climatemanager60@gmail.com>, 'Ross McKitrick' <ross.mckitrick@gmail.com>, 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>, 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

DOE Team:

It would be good to post the following as soon as possible:

- The expert reviews and our responses that took place before the CWG report was released. We should also post the version of the report that those reviewers were commenting on.
- The public comments on the Federal Register portal. It currently shows 109 comments received, yet none are visible.

Putting these materials online at this early post-release time would signal our willingness to promote dialog and respond to criticisms.

Steve Koonin

This message does not originate from a known Department of Energy email system.
Use caution if this message contains attachments, links or requests for information.

From: Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:36 PM
To: Steven Koonin; 'Josh Loucks'; Ison, Jeremy T.; Park, Charles
Cc: 'John Christy'; 'Ross McKittrick'; 'Judith Curry'; 'Roy W. Spencer'
Subject: Re: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

Hi Steve,

The public comments have to go through a review to ensure they are appropriate and able to be posted publicly. I'm told this is a standard process for all DOE public comment periods. Looping in Charles Park to see if GC has an idea of when the 109 comments will be available.

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Date: Thursday, August 7, 2025 at 4:27 PM
To: 'Josh Loucks' <loucksj14@gmail.com>, Woods, Andrea <andrea.woods@hq.doe.gov>, Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Cc: 'John Christy' <climatemanager60@gmail.com>, 'Ross McKittrick' <ross.mckittrick@gmail.com>, 'Judith Curry' <curry.judith@gmail.com>, 'Roy W. Spencer' <roywspencer@hotmail.com>
Subject: [EXTERNAL] when can we expect the postings?

DOE Team:

It would be good to post the following as soon as possible:

- ? The expert reviews and our responses that took place before the CWG report was released. We should also post the version of the report that those reviewers were commenting on.
- ? The public comments on the Federal Register portal. It currently shows 109 comments received, yet none are visible.

Putting these materials online at this early post-release time would signal our willingness to promote dialog and respond to criticisms.

Steve Koonin

This message does not originate from a known Department of Energy email system.
Use caution if this message contains attachments, links or requests for information.

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Thursday, August 7, 2025 4:27 PM
To: 'Josh Loucks'; 'Woods, Andrea'; 'Ison, Jeremy T.'
Cc: 'John Christy'; 'Ross McKittrick'; 'Judith Curry'; 'Roy W. Spencer'
Subject: when can we expect the postings?

DOE Team:

It would be good to post the following as soon as possible:

- The expert reviews and our responses that took place before the CWG report was released. We should also post the *version of the report that those reviewers were commenting on*.
- The public comments on the Federal Register portal. It currently shows 109 comments received, yet none are visible.

Putting these materials online at this early post-release time would signal our willingness to promote dialog and respond to criticisms.

Steve Koonin

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Thursday, August 7, 2025 8:21 PM
To: Steve Koonin
Cc: Judith Curry; Ross McKittrick; Roy W. Spencer; Travis Fisher
Subject: Re: National Academies Launch Fast-Track Review of Latest Evidence for Whether Greenhouse Gas Emissions Endanger Public Health and Welfare | National Academies

Molecular biologist ... interesting

John Christy
Director, Earth System Science Center
Professor, Atmos and Earth Science
Alabama State Climatologist
The University of Alabama in Huntsville
climateman60@gmail.com

On Aug 7, 2025, at 7:16 PM, Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

<https://www.nationalacademies.org/news/2025/08/national-academies-launch-fast-track-review-of-latest-evidence-for-whether-greenhouse-gas-emissions-endanger-public-health-and-welfare>

Steven E. Koonin

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Thursday, August 7, 2025 8:16 PM
To: Judith Curry; Ross McKittrick; John Christy; Roy W. Spencer; Travis Fisher
Subject: National Academies Launch Fast-Track Review of Latest Evidence for Whether
Greenhouse Gas Emissions Endanger Public Health and Welfare | National Academies

<https://www.nationalacademies.org/news/2025/08/national-academies-launch-fast-track-review-of-latest-evidence-for-whether-greenhouse-gas-emissions-endanger-public-health-and-welfare>

Steven E. Koonin

From: Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>
Sent: Friday, August 15, 2025 5:09 PM
To: Judith Curry; Steve Koonin; John Christy; Ross McKittrick; Roy Spencer
Subject: RE: [EXTERNAL] Fwd: Hungarian translation of the DOE Climate Report

Thanks for flagging. Looking into this.

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Friday, August 15, 2025 9:12 AM
To: Ison, Jeremy T. <jeremy.ison@hq.doe.gov>; Steve Koonin <steven.koonin@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: [EXTERNAL] Fwd: Hungarian translation of the DOE Climate Report

Hello Jeremy, do you see any problem with this? If we receive similar requests, do we have permission to approve? Thanks

----- Forwarded message -----

From: Szarka László <szarka@ggki.hu>
Date: Fri, Aug 15, 2025 at 6:01 AM
Subject: Hungarian translation of the DOE Climate Report
To: <curry.judith@gmail.com>, <steven.koonin@gmail.com>, <christy@nsstc.uah.edu>, <roy.spencer@nsstc.uah.edu>, <ross.mckittrick@gmail.com>

curry.judith@gmail.com
steven.koonin@gmail.com
christy@nsstc.uah.edu
roy.spencer@nsstc.uah.edu
ross.mckittrick@gmail.com

Dear Authors!

On behalf of the Hungarian "climate and energy" scientific community (which primarily includes the Energy Working Group of the Batthyány Society of Professors but also the Hungarian signatories of Clintel' WCD), I would like to express my great gratitude for the groundbreaking climate report that you have prepared: A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate.

Short excerpts (the introductions and chapter summaries) have already been published in my translation by a Hungarian weekly magazine (<https://demokrata.hu/tudomany/a-szen-dioxid-nem-ellenseg-hanem-barat-1036812/>). This magazine has published interviews with among others Richard Lindzen and Samuel Furfari).

The Hungarian translation of the full report is now complete. Attached I am sending the version that is still under review. I will send it as a working document to Hungarian colleagues. I am uncertain about the issue of online publishing the Hungarian version, because it is stated at the beginning of the report that "This report is disseminated by the Department of Energy".

I respectfully ask if there is any obstacle for us (Batthyány Society of Professors, PBK) this Hungarian translation on our website? We would like to shape the thinking of the Hungarian public, and the decision makers, of course.

I would like to offer the DOE to publish the report in Hungarian (and then perhaps the final version) I am aware, I can write a letter to an official address (DOEGeneralCounsel@hq.doe.gov), but before that I would like to ask for your opinion, and, if possible, your consent.

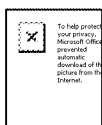
The President of the Hungarian Academy of Sciences has made a verbal promise that the Hungarian Academy of Sciences is willing to organize a climate debate that will include both pro and con views. In this context I respectfully ask if there is a chance that you would be able to come to Hungary this year or next year

Yours sincerely:

László Csaba SZARKA, Geophysicist, Member of the Hungarian Academy of Sciences,
Chair of the PBK Energy Working Group, Clintel Ambassador, Hungary

Co-author of two articles cited in the DOE report (Connolly et al. 2021 and Soon et al 2023), and reviewer of the Hungarian edition of Koonin's "Unsettled"

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

This message does not originate from a known Department of Energy email system.
Use caution if this message contains attachments, links or requests for information.

From: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
Sent: 8/15/2025 1:12:00 PM
To: Ison, Jeremy T. [jeremy.ison@hq.doe.gov]; Steve Koonin [steven.koonin@gmail.com]; John Christy [climatemanager60@gmail.com]; Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]; Roy Spencer [roywspencer@hotmail.com]
Subject: Fwd: Hungarian translation of the DOE Climate Report
Attachments: TELJES_FORDITAS_2025_08_14.pdf

Hello Jeremy, do you see any problem with this? If we receive similar requests, do we have permission to approve? Thanks

----- Forwarded message -----

From: **Szarka László** <szarka@ggki.hu>
Date: Fri, Aug 15, 2025 at 6:01 AM
Subject: Hungarian translation of the DOE Climate Report
To: <curry.judith@gmail.com>, <steven.koonin@gmail.com>, <christy@nsstc.uah.edu>, <roy.spencer@nsstc.uah.edu>, <ross.mckittrick@gmail.com>

curry.judith@gmail.com
steven.koonin@gmail.com
christy@nsstc.uah.edu
roy.spencer@nsstc.uah.edu
ross.mckittrick@gmail.com

Dear Authors!

On behalf of the Hungarian "climate and energy" scientific community (which primarily includes the Energy Working Group of the Batthyány Society of Professors but also the Hungarian signatories of Clintel' WCD), I would like to express my great gratitude for the groundbreaking climate report that you have prepared: A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate.

Short excerpts (the introductions and chapter summaries) have already been published in my translation by a Hungarian weekly magazine (<https://demokrata.hu/tudomany/a-szen-dioxid-nem-ellenseg-hanem-barat-1036812/>). This magazine has published interviews with among others Richard Lindzen and Samuel Furfari).

The Hungarian translation of the full report is now complete. Attached I am sending the version that is still under review. I will send it as a working document to Hungarian colleagues. I am uncertain about the issue of online publishing the Hungarian version, because it is stated at the beginning of the report that "This report is disseminated by the Department of Energy".

I respectfully ask if there is any obstacle for us (Batthyány Society of Professors, PBK) this Hungarian translation on our website? We would like to shape the thinking of the Hungarian public, and the decision makers, of course.

I would like to offer the DOE to publish the report in Hungarian (and

then perhaps the final version) I am aware, I can write a letter to an official address (DOEGeneralCounsel@hq.doe.gov), but before that I would like to ask for your opinion, and, if possible, your consent.

The President of the Hungarian Academy of Sciences has made a verbal promise that the Hungarian Academy of Sciences is willing to organize a climate debate that will include both pro and con views. In this context I respectfully ask if there is a chance that you would be able to come to Hungary this year or next year

Yours sincerely:

László Csaba SZARKA, Geophysicist, Member of the Hungarian Academy of Sciences,
Chair of the PBK Energy Working Group, Clintel Ambassador, Hungary

Co-author of two articles cited in the DOE report (Connolly et al. 2021 and Soon et al 2023), and reviewer of the Hungarian edition of Koonin's "Unsettled"

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata

Az USA energiaügyi minisztere számára amerikai klímakutatók által a klímaváltozás „oktulajdonításáról” készített jelentés magyar fordítása

Bevezető a magyar változathoz

Az Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma megbízására öt neves kutató újraértékelte az energetikai zöldátállás klímaváltozási megokolásának alapjait. A mintegy 150 oldal terjedelmű, gyökeres szemléletváltásról tanúskodik. (Link: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE_Critical_Review_of_Impacts_of_GHG_Emissions_on_the_US_Climate_July_2025.pdf).

E magyar fordítás a 2025. július 23-ai keltezésű USA-dokumentumot (a miniszteri előszót, a vezetői összefoglalót, a szerzők (John Christy, Judith Curry, Steven Koonin, Ross McKittrick, Roy Spencer) által írt bevezetőt, valamint a dokumentum tizenkét fejezetét is tartalmazza.

A világban ma uralkodó nézet szerint a jelenlegi klímaváltozást – a felmelegedést és az időjárási szélsőségek fokozódását – az légköri üvegházgáz-koncentráció emelkedése okozza, aminek fő oka az emberi CO₂-kibocsátás. A klímaegyezményeken keresztül az országok többsége elfogadta, hogy a CO₂-kibocsátást a légköri üvegházgáz-koncentráció további növekedésének megállítása, majd későbbi csökkentése, ezáltal a klímaváltozás jövőbeli mérséklése érdekében korlátozni kell. A klímaegyezményben résztvevő országok arra is kötelezték magukat, hogy előkészítik az egyének, a közösségek, az élőhelyek, a létesítmények és összességében a társadalom alkalmazkodását, hogy a megváltozó klíma hatásai kevésbé legyenek negatívak. Ez az ENSZ, a Világgazdasági Fórum, az Európai Unió „hivatalos” világnézete.

A fenti gondolatmenet egyes lépéseivel és egészével kapcsolatban kezdettől fogva fogalmazódtak meg jogos tudományos kritikák, mégis nagyon sokan elfogadják (nemzetközi szinten és Magyarországon egyaránt). Ma, a 2020-as évek közepén, a dekarbonizáció erőltetett fázisában újra elkezdett nőni azok száma, akik – észlelve az energiaátállás költségeit és csapdáit – megkérdőjelezi az erőltetett zöldátállást, ugyanakkor elfogadják, hogy a földi léghajlatot az ember „tönkretette”. Végül vannak olyan következetes gondolkodók (például a holland Clintel, a német EIKE, a brit GWPF, Magyarországon többek között a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoportjának természettudományi-műszaki tagjai vonzáskörében), akik képesek a vitatott kérdéseket rendszerbe foglalni, és megalapozott ellenvéleményüket hangoztatni, Mindez azonban mindeddig Don Quijote-i küzdelemnek, falra hányt borsónak tűnt.

Örvendetes, sőt valóságos csodaszámba megy, hogy az USA energiaügyi minisztere számára készített amerikai tanulmány nem frázisokat puffogat, hanem higgadtan érvel. A szerzőtársak óvatosan, körültekintően fogalmaznak (különösen a vezetői összefoglalóban), mégis ízekre szedik a dogmát (és anélkül, hogy a CO₂ szerepét alapjaiban megkérdőjeleznék).

Az amerikai tanulmány világszerte – így remélhetőleg Magyarországon, többek között a Magyar Tudományos Akadémián is – új lendületet adhat az energetikai zöldátállásról, a klíma-energia-környezet összetett kérdésköréről folyó, nagyon is szükséges tudományos vitáknak.

A címloldal magyar fordítása:

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó hatásainak kritikai felülvizsgálata

Jelentés Christopher Wright amerikai energiaügyi miniszter számára
2025. július 23.

Klímaváltozási Munkacsoport:

John Christy, PhD

Judith Curry, PhD

Steven Koonin, PhD

Ross McKittrick, PhD

Roy Spencer, PhD

Ezt a jelentést az Energiaügyi Minisztérium terjeszti. Mint ilyen, e dokumentum a 2001-es költségvetési évre vonatkozó kincstári és általános kormányzati előirányzatokról szóló törvény (106-554. számú közjog) 515. szakaszának és az Energiaügyi Minisztérium által kiadott információminőségi irányelveknek megfelelően készült.

Copyright © 2025 Egyesült Államok

Javasolt hivatkozás:

Klímaváltozási Munkacsoport (2025): Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata. Washington DC: Energiaügyi Minisztérium, 2025. július 23.

A Jelentés tartalomjegyzéke:

MINISZTERI ELŐSZÓ

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

BEVEZETŐ

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐANYAG

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

2.1 A CO₂, MINT A GLOBÁLIS ZÖLDÜLÉSHEZ HOZZÁJÁRULÓ TÉNYEZŐ

2.1.1 A globális zöldülés mérése

2.1.2 Fotoszintézis és CO₂-szint

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

2.2 A LÚGOS ÓCEÁNOK

2.2.1 A pH változása

2.2.2 Korallzátony-változások

3 AZ EMBER HATÁSA AZ ÉGHAJLATRA

3.1 A SUGÁRZÁSI KÉNYSZER ÖSSZETEVŐI ÉS TÖRTÉNETÜK

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

3.2 JÖVŐBENI KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYVEK ÉS A SZÉNCIKLUS

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

3.2.2 A kibocsátásokhoz és koncentrációkhoz kapcsolódó szénciklus

3.3 AZ URBANIZÁCIÓ HATÁSA A HŐMÉRSÉKLETI TRENDRE

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

4.1 BEVEZETÉS

4.2 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG MODELLALAPÚ BECSLÉSE

4.3 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG ADATALAPÚ BECSLÉSE

4.4 TRANZIENS KLÍMAÉRZÉKENYSÉG

5 ELTÉRÉSEK A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

5.1 BEVEZETÉS

5.2 FELSZÍNI MELEGEDÉS

5.3 TROPOSZFÉRIKUS MELEGEDÉS

5.4 ELTÉRÉSEK A FÜGGŐLEGES HŐMÉRSÉKLET-PROFIL MENTÉN

5.5 SZTRATOSZFÉRIKUS HŰLÉS

5.6 ELTÉRÉSEK A HÓTAKARÓBAN

5.7 A PLANETÁRIS ALBEDÓ FÉLGÖMBI SZIMMETRIÁJA

5.8 AZ USA KUKORICAÖVEZETE

6. SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

6.1 BEVEZETÉS

6.2 HURRIKÁNOK ÉS TRÓPUSI CIKLONOK

6.3 HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

6.3.2 Hőkülönb-tülpépések

6.3.3 Hőhullámok

6.4 SZÉLSŐSÉGES CSAPADÉK

6.5 TORNÁDÓK

6.6 ÁRVÍZEK

6.7 SZÁRAZSÁG

6.8 FUTÓTÜZEK

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

7.1 GLOBÁLIS TENGERSZINT-EMELKEDÉS

7.2 AZ USA TENGERSZINT-EMELKEDÉSE

7.3 A VÁRHATÓ TENGERSZINT-EMELKEDÉS

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

8.1 BEVEZETÉS

8.2 OKTULAJDONÍTÁSI MÓDSZEREK

8.3 A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS OKTULAJDONÍTÁSA

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

8.3.3 Idősoros módszerek

8.4 CSÖKKENŐ BOLYGÓALBEDO ÉS A LEGUTÓBBI REKORMELEGEDÉS

8.5 AZ ÉGHAJLATI HATÓTÉNYEZŐKRE VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6 SZÉLSŐSÉGES ESEMÉNYEKRE (EEA) VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6.1 Esettanulmány – a 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

9.1 ÖKONOMETRIAI ELEMZÉSEK

9.2 A CO₂-DÚSULÁS TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI ELEMZÉSE

9.3 TERMÉSMODELLEZÉSI METAELMZÉSEK

9.4 A CO₂-TRÁGYÁZÁS ÉS A TÁPANYAGVESZTÉS

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

10.1 TÁRSADALMI-GAZDASÁGI HÁTTÉR

10.2 AZ ADATOK ÁLTAL JELENTETT KIHÍVÁSOK

10.3 HALÁLOZÁS A HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK MIATT

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

11.1 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS GAZDASÁGI NÖVEKEDÉS

11.1.1 Áttekintés

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adataalapú elemzése

11.2 MODELLEK A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGÉRE (SCC)

11.2.1 Az SCC becslése

11.2.2 Az SCC változásai

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

11.2.4 Fordulópontok

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

12.1 A LÉPTÉKPROBLÉMA

12.2 ESETTANULMÁNY: AZ USA-GÉPJÁRMŰVEK KIBOCSÁTÁSA

12.3 ZÁRÓGONDOLATOK

SZÓJEGYZÉK

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

A SZERZŐKRŐL

MINISZTERI ELŐSZÓ

Az energia, az integritás és az emberi potenciál ereje

Egész életem során kiváltságos helyzetben volt részem: számos területen dolgozhattam energiaipari vállalkozóként (atomenergia, geotermikus energia, földgáz és egyebek), jelenleg pedig Donald Trump elnök alatt szolgálok energiaügyi miniszterként. De mindenekelőtt fizikus kutató vagyok, aki a modern energiát csodás kincsnek tekinti. Ez hajtja a modern élet minden területét, mozgatja az összes iparágat, Amerikát olyan energianagyhatalommá téve, amely képes a globális fejlődés hajtóerejévé válni.

Az emberiség felvirágzása az elmúlt két évszázadban egy ünneplésre méltó történet. Mégis azt hajtogatják nekünk –megállás nélkül –, hogy azok az energiarendszerek, amelyek lehetővé tették ezt a fejlődést, immár létünket fenyegetik. Érvelésük szerint a szénhidrogén alapú üzemanyagokról gyorsan le kell mondani, különben a bolygó pusztulását kockáztatjuk.

E nézet beható vizsgálatot követel. Ebből a célból rendeltem meg a jelentést. Az éghajlatváltozásról és az energiáról jobban átgondolt és tudományosan megalapozott párbeszédet kívánok ösztönözni. Szakmai hátterem birtokában áttekintettem az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) jelentéseit, az Egyesült Államok kormányainak értékeléseit, valamint a tudományos szakirodalmat. Számos klímakutatóval is kapcsolatba léptem, többek között e jelentés szerzőivel is.

Azt tapasztaltam, hogy a média gyakran eltorzítja a tudományt. A klímaváltozásról sokakban egy eltúlzott, illetve hiányos kép alakítanak ki. Az érthetőség és az egyensúly megteremtése érdekében felkértem egy független szakértőkből álló, sokféle szempontot figyelembe vevő csapatot, hogy kritikusan tekintsék át a klímatudomány jelenlegi helyzetét, különös tekintettel az Egyesült Államokbeli viszonyokra.

Nem azért választottam ezeket a szerzőket, mert mindig egyetértünk – egyáltalán nem. Sőt, lehet, hogy ők sem mindig értenek egyet egymással. Hanem a szigorúságuk, a becsületességük és a vitaszínvonal emelése érdekében választottam őket. Nem gyakoroltam befolyást a következtetéseikre. Amit olvasni fognak, az az ő művük, ami az elérhető legjobb adatokon és tudományos értékeléseken alapul.

A jelentést alaposan átnéztem, és úgy vélem, hogy hűen tükrözi a klímatudomány jelenlegi helyzetét. Ennek ellenére számos olvasó meglepődhet a következtetésein – amelyek lényegi módon eltérnek attól, amit a főszó (a mainstream narratíva) állít. Ez annak a jele, hogy a nyilvánosság előtti párbeszéd a tudománytól nagyon távolra került.

A helyes irány eléréséhez nyílt, tiszteletteljes és tájékozott vitákra van szükség. Ezért erről a jelentésről nyilvános véleményeket kérek. Politikai döntéshozatalunk középpontjában a becsületes vizsgálódásnak és a tudományos átláthatóságnak kell állnia.

Az éghajlatváltozás valós, és figyelmet érdemlő kérdés. De nem ez az emberiség előtt álló legnagyobb fenyegetés. Inkább a globális energiaszegénység érdemelne megkülönböztetett figyelmet. Adatok értékelésével foglalkozom, tudom tehát, hogy az emberi életkörülmények javítása a megbízható, megfizethető energiához való hozzáférés bővítésétől függ. Az éghajlatváltozás ugyan kihívást jelent, de nem katasztrófa! Ami ténylegesen veszélyeztetheti az emberi jólétet, az a tényeket mellőző, félelemre építő, félrevezető szakpolitika.

Az energiairányítás új korszakának küszöbén állunk. Ha az innovációt inkább támogatjuk, mint korlátozzuk, Amerika világvezető szerepet tölthet be a tisztább, bőségesebb energia biztosításában – milliárdokat felemelve a mélyszegénységből, erősítve gazdaságunkat és javítva környezetünket.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

E jelentés áttekinti mindazokat a tudományos bizonyosságokat és bizonytalanságokat, amelyek arról szólnak, hogy az antropogén szén-dioxid (CO_2) és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátása miként befolyásolta, vagy fogja befolyásolni az ország (az USA) éghajlatát, a szélsőséges időjárási eseményeket, valamint a társadalmi jólét egyes mutatóit. E kibocsátás egy összetett és változékony szencikluson keresztül megemeli a légköri CO_2 -koncentrációt, és a többlet CO_2 egy része évszázadokig fennmarad a légkörben.

A megemelkedett CO_2 -koncentráció közvetlenül elősegíti a növények növekedését, globálisan hozzájárulva a bolygó „zöldüléséhez” és a mezőgazdasági termésnöveléshez [2.1. szakasz, 9. fejezet]. Emellett csökkenti az óceánok lúgosságát (a pH értékét). Lehetséges, hogy káros a korallzátonyokra, bár a Nagy-korallzátony közelmúltbeli felélédece nem erre utal [2.2. szakasz].

A szén-dioxid egyben üvegházhatású gáz is, melegítő hatást gyakorolva az éghajlatra és az időjárásra [3.1. szakasz]. Az éghajlatváltozással kapcsolatos előrejelzésekhez a jövőbeli kibocsátásról forgatókönyvek szükségeltetnek. Bizonyítékok léteznek arra, hogy a klímahatásokkal foglalkozó szakirodalomban széles körben használt forgatókönyvek a megfigyelt és valószínűsíthető jövőbeli kibocsátási trendeket eltúlozzák [3.1. szakasz].

A világban létező több tucatnyi globális klímamodell édeskevés útmutatást ad arra vonatkozóan, hogy az éghajlat milyen mértékben reagál a megemelkedett CO_2 -szintre: ezek szerint a CO_2 -koncentráció megduplázódása esetén a földfelszínen az átlagos felmelegedés mértéke $1,8^\circ\text{C}$ és $5,7^\circ\text{C}$ között mozog [4.2. szakasz]. Az adatalapú módszerek alacsonyabb és szűkebb tartományt jeleznek [4.3. szakasz]. A globális klímamodellek az elmúlt évtizedek éghajlatát általában „forró” módon írják le – a valóságot eltúlzó felszíni felmelegedést mutatnak, valamint túl nagy felmelegedésfelerősödést az alsó és a középső troposzférában [5.2-5.4. szakaszok]. A túlságosan érzékeny modellek és a jövőbeli kibocsátásokra vonatkozó valószínűtlen, szélsőséges forgatókönyvek kombinációja a jövőben vélt felmelegedési előrejelzésekben nagy túlzásokra vezet.

Az Egyesült Államokban a legtöbb szélsőséges időjárási esemény alakulásában nem mutatkozik hosszú távú tendencia. Az USA történelmi adatai nem támasztják alá a hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok gyakoriság- vagy intenzitás-növekedésére vonatkozó állításokat [6.1-6.7. szakaszok]. Ezenkívül az tűzvész-aktivitás változásainak értékelésekor az erdőgazdálkodási gyakorlatot rendszerint figyelmen kívül hagyják [6.8. szakasz]. A globális tengerszint 1900 óta körülbelül 20 centiméterrel emelkedett, de ebben jelentős regionális eltérések vannak, amiket elsősorban helyi szárazföld-süllyedés okoznak; az amerikai parti tengerszint-mérők (mareográfok) mérésösszesítései nem mutatják, hogy a tengerszint-emelkedés egyértelműen nagyobb ütemű lenne, mint amekkora a történelmi átlag [7. fejezet].

Az éghajlatváltozás vagy a szélsőséges időjárási események emberi CO_2 -kibocsátásnak való tulajdonítást (az ún. okutajdonítást) a természetes éghajlati változékonyság, az adatok elérhetősége és a modellek eredendő hiányosságai miatt megkérdőjelezhető [8. fejezet]. Ezenkívül az is lehetséges, hogy a naptevékenység 20. század végi felmelegedéshez való hozzájárulása alá lett becsülve [8.3.1. szakasz].

Mind a modellek, mind a tapasztalatok arra utalnak, hogy a CO_2 által kiváltott felmelegedés gazdaságilag minden bizonnyal kevésbé káros, mint azt általában hiszik, és a túlzottan agresszív mérséklési politikák inkább bizonyulhatnak károsnak, mint előnyösnek [9., 10. fejezet, 11.1. szakasz]. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségeit számszerűsíteni próbáló gazdasági kárbecslések rendkívül érzékenyek a kiindulási feltételezésekre, ezért információtartalmuk igen korlátozott [11.2. szakasz].

Az USA politikai intézkedései várhatóan kimutathatatlanul kis közvetlen hatással vannak a globális éghajlatra, és bármilyen hatás csak hosszú időközökkel jelentkezik [12. fejezet]

BEVEZETŐ

E dokumentum keletkezése 2025. március végére vezethető vissza, amikor Wright miniszter összeállított egy független csoportot, hogy jelentés készüljön az energiapolitika-alkotás szempontjából releváns klímatudományi kérdésekről, többek között a közvélekedést megkérdőjelező bizonyítékokról és nézőpontokról. A munka elvégzésébe azzal a feltétellel egyeztünk bele, hogy sem a miniszter, sem az Energiaügyi Minisztérium, sem más kormányzati alkalmazott nem gyakorol szerkesztői felügyeletet. Ezt a feltételt a folyamat során végig betartottuk, és az csoport teljesen függetlenül dolgozott.

A csapat április elején kezdte meg a munkát, május 28-i határidővel, hogy a tervezetet be lehessen nyújtani egy energiaügyi minisztériumi belső felülvizsgálatra. A rövid határidő és az anyag technikai jellege miatt nem tudtunk teljesen átfogó áttekintést adni. Ezért inkább olyan témákra összpontosítottunk, amelyeket a komoly, elismert tudományos szakirodalom is tárgyal; amelyek a feladatunk szempontjából időszerűek; amelyeket a legújabb értékelő jelentések alábecsülnek vagy hiányoznak belőlük; és amelyek a mi kompetenciánkba tartoznak.

Bár a jelentés célja, hogy a nem szakértők számára is érthető legyen, kihagytunk néhány bevezető vagy magyarázó anyagot, ezek másutt könnyen elérhetők. Nem törekedtünk arra sem, hogy áttekintsük a tárgyalt témákhoz tartozó teljes szakirodalmat. Amennyire csak lehetséges volt, a 2020 óta megjelent szakirodalomra összpontosítottunk, és hivatkoztunk az előző IPCC és NCA (nemzeti klímaértékelési) értékelő jelentésekre. Ahol lehetséges volt, 2024-ig terjedő adatokat is felhasználtunk.

Az szerzői team hálás Wright miniszternek a jelentés elkészítésének lehetőségéért, valamint a független tudományos értékelés és a nyílt tudományos vita támogatásáért. Hálásak vagyunk az Energiaügyi Minisztérium (DOE) és a nemzeti laboratóriumi bírálók anonim csapatának is, mert hozzájárultak ahhoz, hogy a végleges jelentés még jobb legyen.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐ ANYAG

Fejezet-összefoglaló

A szén-dioxid (CO₂) sok tekintetben különbözik az úgynevezett szabványos légszennyező anyagoktól (a CAP-októl). Nem befolyásolja a helyi levegőminőséget, és környezeti szinten nincsenek humántoxikológiai következményei. A globális éghajlatra gyakorolt hatása miatt veszik számba lehetséges tényezőként.

Az 1970-es Tiszta Levegő Törvény hat úgynevezett EPA-szabályozás alá eső kritérium szerinti légszennyező anyagot határozott meg: szálló por, talajközeli ózon, kén-dioxid, nitrogén-dioxid, ólom és szén-monoxid. 2007-ben a Legfelsőbb Bíróság kimondta, hogy az üvegházhatású gázok (köztük a CO₂) ugyancsak „szennyező anyagok”, és rájuk is vonatkozik a Tiszta Levegő Törvénye (Mass. kontra EPA, 2007). Bár a „szennyezőanyag” definíciója végső soron jogi kérdés, fontos tudományos különbségek vannak a CO₂ és a kritérium szerinti (szabványos) légszennyező anyagok között. Ez utóbbiak szabályozási ellenőrzés alatt állnak, mivel a koncentrációjuktól függően helyi problémákat okoznak: az embereknek kellemetlenséget (szagot, láthatóság-csökkenést), növényi károsodást, és kellően magas expozíciós szintek esetén toxikológiai hatásokat okoznak. Ezzel szemben a CO₂ szagtalan, nem befolyásolja a láthatóságot, és környezeti szinten nincs toxikológiai hatása. A légkör természetes része, és kulcsfontosságú eleme az emberi és növényi légzésnek. A CO₂ elengedhetetlen a növényi fotoszintézishez, magasabb szintje pedig előnyös a növényzet számára. E tekintetben a CO₂ hasonló a vízgőzhöz.

A kültéri környezet levegője ma körülbelül 430 ppm CO₂-t tartalmaz, ami évente körülbelül 2 ppm-mel emelkedik. Az Egyesült Államok Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala irányelveket ad ki a beltéri munkahelyekre, ahol megemelkedett CO₂-szinttel találkozhatunk, például ahol szárazjeget használnak. A megengedett expozíciós határérték 5000 ppm 8 órán át (OSHA, 2024). Allen et al. (2015) arról számolt be, hogy az irodai fülkékben dolgozók teljesítménye, amikor 1000-1500 ppm feletti CO₂-szintnek voltak kitéve, bizonyos kognitív feladatokban csökkent. E szint jóval magasabb, mint bármely, a 22. század végéig valószínűsíthető kültéri környezeti érték.

A légkörben lévő CO₂ növekvő mennyisége közvetlenül befolyásolja a földi rendszert azáltal, hogy elősegíti a növények növekedését (a globális zöldülés), ezáltal növeli a mezőgazdasági terméshozamot, és semlegesíti az óceán lúgosságát. A CO₂-vel kapcsolatos elsődleges aggodalom azonban az üvegházgázként (ÜHG) betöltött szerepe, amely megváltoztatja a Föld energiaegyensúlyát, felmelegíti a bolygót. Az, hogy az éghajlat hogyan reagál erre a hatásra, egy összetett kérdés, ez tölti ki a jelentés nagy részét.

Hivatkozások

- Allen, J., Macnaughton, P., Satish, U., et al. (2015). A kognitív funkciók pontszámainak összefüggései a szén-dioxid-, a szellőztetés- és az illékony szerves vegyületek expozíciójával irodai dolgozóknál: Kontrollált expozíciós vizsgálat zöld és hagyományos irodai környezetekben. Környezeti egészségügyi perspektívák. 124. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Massachusetts kontra Környezetvédelmi Ügynökség, 549 U.S. 497 (2007). <https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120>
- USA Környezetvédelmi Ügynökség. (é.n.). Kritériumok a légszennyezőkre. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- USA Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala. (2024). OSHA foglalkozási vegyi adatbázis: Szén-dioxid. <https://www.osha.gov/chemicaldata/183>

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

Fejezet-összefoglaló

A CO₂ fokozza a fotoszintézist és javítja a növények vízfelhasználási hatékonyságát, ezáltal elősegíti a növények növekedését. A globális zöldülés, amely részben a légkörben megnövekedett CO₂-szintnek köszönhető, mindegyik kontinensen jól kimutatható.

Ha a CO₂ a tengervízben elnyelődik, az óceánok lúgossága csökken. A pH-érték jelenkori csökkenése nem lépi túl az évezredek időléptékében megfigyelhető természetes változékonysági tartományt. Az óceáni élővilág nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak. A pH-csökkenés hátrányosan befolyásolhatja a korallokat, ugyanakkor az ausztrál Nagy-korallzátony az elmúlt években jelentős növekedést mutat.

2.1 A CO₂, mint a globális zöldüléshez hozzájáruló tényező

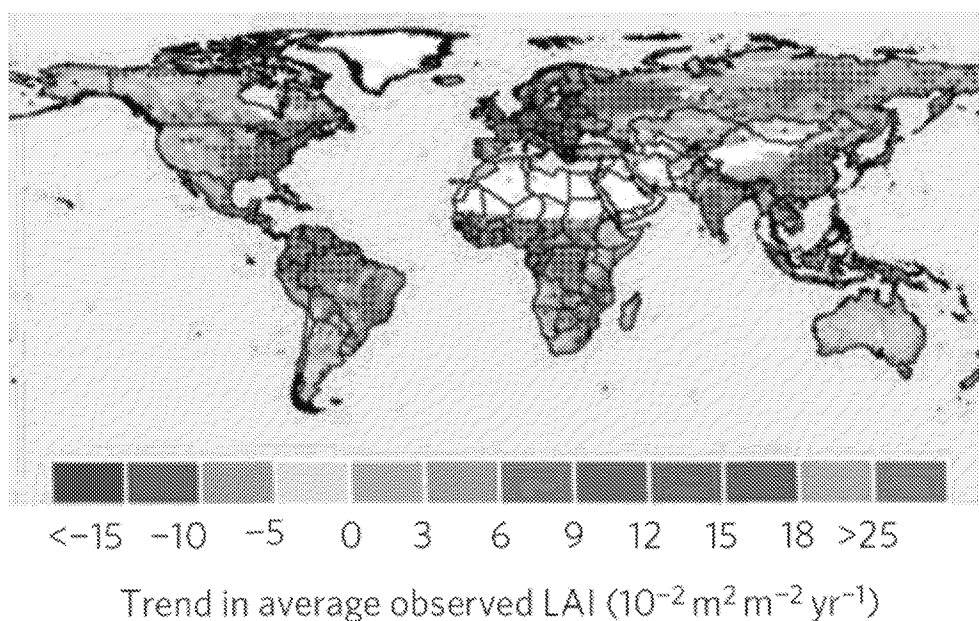
A légkörben az emelkedő CO₂-koncentráció fontos pozitív hatással bír, mivel elősegíti a növények növekedését a fotoszintézis fokozásával és a vízfelhasználás hatékonyságának javításával. Ami megnyilvánul az alábbiakban tárgyalt „globális zöldülés” jelenségében, valamint a 10. fejezetben tárgyalt javuló mezőgazdasági hozamokban is. Itt csak a CO₂-trágyázásra összpontosítunk; a hőmérséklet- és csapadékváltozások együttes hatásainak kutatását a 10. fejezet tárgyalja.

2.1.1 A globális zöldülés mérése

A „zöldülés” a földfelszín növényzettel borított részarányának növekedését jelenti. A műholdakkal mért „levélfelület-index” (LAI) segítségével számszerűsíthető is. Az elmúlt évtized során számos tanulmány erősítette meg a globális zöldülési mintázatot (LAI növekedés), amely részben az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonítható. Zhu et al. (2016) az elsők között voltak, akik arról számoltak be, hogy a globális zöldülés műholdas érzékelők segítségével kimutatható. 1982 és 2011 között a Föld területének 25-50 százalékán észleltek zöldülést, szemben a mindössze négyenél alig több százaléknyi „barnulással”, és a zöldülés 70 százalékát az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonították (lásd a 2.1. ábrát). További hozzájárulási tényezőt jelent a földhasználat változása, a felmelegedés és a nitrogén. A CO₂-nek tulajdonítható részarány a trópikusokon volt a legnagyobb; a CONUS-ban (az USA területileg összefüggő államaiban) egyéb tényezők játszottak dominánsabb szerepet.

Zeng et al. (2017) megerősítette a zöldülés mintázatát, megjegyezve, hogy a globális levélfelületet harminc év alatt 8 százalékkal növekedett, és hogy a zöldülés mérsékelte a felmelegedést. A zöldülést világszerte megfigyelték. Chen et al. (2019) kimutatták, hogy Kínában és Indiában ennek a nagy részét földgazdálkodási változások okozzák. Így, míg Kína a globális növényzeti területnek csak 6,6 százalékát teszi ki, a LAI globális nettó növekedésében 25 százalékot tesz ki. Piao et al. (2020) megjegyezték, hogy a zöldülés még az Arktiszon is megfigyelhető. A CO₂-trágyázás hatásait befolyásolja a helyi hőmérséklet, valamint a tápanyagok és a víz rendelkezésre állása, amelyek mindegyike regionálisan változik.

Míg a növénymodellek az emelkedő CO₂-szintre válaszként a fotoszintézis növekedését jósolják, Haverd et al. (2020) a modellelőrejelzéseknél sokkal nagyobb CO₂-trágyázási arányról számoltak be. Vagyis a CO₂-trágyázás 1900 óta 30 százalékkal növelte a megfigyelt globális fotoszintézist, szemben a növénymodellek által előrejelzett 17 százalékkal. Ha ez igaz, az arra utal, hogy az emelkedő CO₂ társadalmi-gazdasági hatásainak globális modelljei alábecsülték a növényekre és a mezőgazdaságra gyakorolt előnyöket. Keenan et al. (2023) azonban alacsonyabb trágyázási arányt becsültek, ami jobban összhangban van a modellekkel. A CO₂-trágyázás és a mezőgazdaság közötti kapcsolatot a 9. fejezetben tárgyaljuk.



2.1. ábra: Az átlagos Levélfelületi Index (LAI). Forrás: Zhu et al. 2016, 3. ábra. A LAI dimenzió nélküli mennyiség, amely a növényi lombkorona levélfelületének nagyságát írja le a talajfelülethez viszonyítva.

Piao et al. (2020), valamint Chen et al. (2024) arról számolnak be, hogy a zöldülési trend folytatódik, nincsenek lassulási jelek, és továbbra is a CO₂-trágyázás a domináns hajtóerő.

2.1.2 Fotoszintézis és CO₂-szint

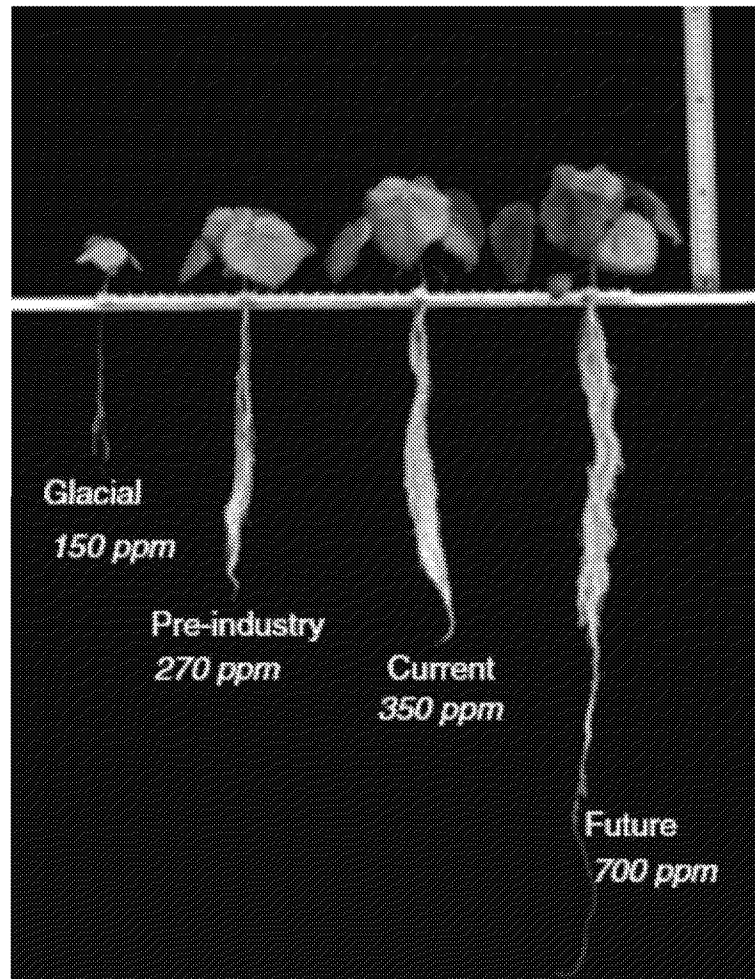
A növények fotoszintézissel építik fel a biomasszát, amely folyamat a szén-dioxidot, a vizet és a fényt cukorrá alakítja. A fotoszintézisért felelős növényi enzim a ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz/oxigenáz vagy „Rubisco”. A fotoszintézis akkor indul be, amikor CO₂ a Rubisco enzim felületén rendelkezésre áll, ahol 3 szénatomos molekulává alakul, majd beépül a növény tömegébe. Ezt „C3” folyamatnak nevezik.

A Rubisco enzim becslések szerint körülbelül 3 milliárd évvel ezelőtt fejlődött ki. A geológiai idők során a Föld légkörének CO₂-szintje általában sokszorosa volt a mai értéknek. Körülbelül 400 millió évvel ezelőtt a CO₂-szint becslései szerint 2000-4000 ppm volt, a 200 és 50 millió évvel ezelőtti időszak nagy részében pedig 1000 ppm vagy annál magasabb (Berner 2006, Judd et al. 2024). A legutóbbi 35 millió évben a légköri CO₂-szint folyamatosan csökkent, a eljegesedések idején akár 170 ppm-re is visszaesett (Gerhart és Ward 2010). Bár a CO₂ jelenkori változásának üteme a korábbi időszakokéhoz képest magas lehet, geológiai bizonyítékok szerint a növények és az állatok a jelenleginél sokkal magasabb CO₂-szint mellett fejlődtek ki.

Az alacsony CO₂-szintre válaszul egyes növények a fotoszintézisre egy másik módot, az ún. C4-et fejlesztettek ki, amelyben a CO₂ a Rubisco közelében koncentrálódik, lehetővé téve a C3 folyamat hatékonyabb működését. Mezőgazdasági célokra a növénykategóriák a következők:

- C3: rizs, búza, szójabab és a legtöbb más növény
- C4: kukorica, cukornád, köles, cirok

A a légköri CO₂-szint további csökkenése esetén a növényi növekedés lelassult volna, majd végül leállt volna. 180 ppm alatt számos C3 faj növekedési üteme a 350 ppm-hez képest (40-60 százalékkal csökken (Gerhart és Ward 2010), és a növekedés 60-140 ppm CO₂-koncentrációjú kísérleti körülmények között teljesen leállt. Egyes C4 növények még 10 ppm-es CO₂-szinten is képesek növekedni, bár nagyon lassan (Gerhart és Ward 2010).



2.2 ábra: A sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) 14 nap alatti növekedése, miközben az összes többi kísérleti körülmény a CO₂-szint kivételével megegyezett. Forrás: Gerhart and Ward (2010). A képen a "Current" (jelenlegi) szint 1988-nak felel meg.

A jelenlegi CO₂-szint körülbelül 430 ppm, szemben az 1800-as évek eleji 280 ppm-mel. A növények pozitív reakcióját a CO₂-többletre a 2.2. ábra szemlélteti, Gerhart és Ward (2010) munkájából reprodukálva. Az ábra a CO₂ növekedési hatását mutatja a sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) palántákra 14 nap alatt, kontrollált körülmények között, ahol csak a CO₂-kitettség változik. A CO₂ 150 ppm-ről 350 ppm-re történő emelésével elért nyereség a 700 ppm-re való további megduplázódás esetén is folytatódik. A legutóbbi több mint 60 évben a növekvő CO₂-szintre adott növényi válaszáról több ezer tanulmány készült. A legfontosabb kutatási téma az, hogy a növények, különösen a C3 növények, profitálnak a többlet CO₂-szintből. A CO₂ két mechanizmus révén biztosít növekedési előnyt:

- A fotoszintézis fokozódása a fent leírt anyagcsere-módokon keresztül.
- A vízfelhasználási hatékonyság megnövekedett. Ez azért történik, mert a növények a levél felszínén lévő gázcserenyílások (pórusok) kinyitásával vonják be a CO₂-t. Amikor a CO₂ szűkösen áll rendelkezésre, a gázcserenyílásokat hosszú ideig kell tágra nyitva tartani, hogy a víz elpárologhasson. CO₂-ben dús körülmények között a gázcserenyílások hosszabb ideig maradnak zárva, így segítve a növényt a víz hosszabb ideig történő megtartásában, ezáltal növelve a vízfelhasználási hatékonyságot. A klímaváltozás amerikai mezőgazdaságra gyakorolt konkrét hatásait a 9. fejezetben tekintjük át.

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

Derying et al. (2016) áttekintették a növények vízhozamát (CWP), azaz a hozam/felhasznált víz arányra vonatkozó bizonyítékokat, ráirányítva a figyelmet arra, hogy a CO₂ képes a fotoszintézis fokozására és a levélszintű párologtatás csökkentésére (a levéllégzés során a vízvesztesség csökkentésére). Felmérték az összes rendelkezésre álló FACE-adatot (szabadlevegős CO₂-dúsulást – ld. 9. fejezet) a kukorica, a búza, a rizs és a szója terméshozam-változásairól, és kombinálták azokat a 2080-as állapotra vonatkozó terméshozam-válaszokat szimuláló növénymodell-adatokkal a szélsőséges RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv szerint négy termesztő régióban (trópusi, száraz, mérsékelt és hideg), amelyek mindegyikét esővel öntözött és mesterségesen öntözött alrégiókra osztották. Jelentésük szerint a CO₂-trágyázás nélküli modellek minden régióban CWP-vesztéssel jósoltak, de ezeket a CO₂-trágyázás bőven ellensúlyozta, így minden régió nettó CWP-növekedést mutatott. Derying et al. (2016) arról is beszámolt, hogy a felmelegedés búza- és szójababhozamokra gyakorolt negatív hatásait teljes mértékben ellensúlyozta a CWP-növekedés. A rizs esetében a mitigáció akár 90%-osnak, a kukorica esetében pedig 60%-osnak bizonyult.

Hasonlóképpen, Cheng et al. (2017) megjegyezte, hogy az 1982 és 2011 között a növekvő CO₂-megkötés miatt megnövekedett bruttó elsődleges termelés (GDP) olyan nagymértékű nyereséggel járt együtt a növényzet vízfogyasztásában (CWP), hogy a növények globális vízfelhasználása a többlet biomassa ellenére sem nőtt.

Derying et al. (2016) azt feltételezte, hogy a klímaváltozás „súlyosbítja a vízhiányt”. Míg a modellek azt jósolják, hogy a felmelegedés hatására a száraz területek nagysága nő, a jelenlegi adatok az ellenkezőjét mutatják: még a száraz területek is zöldülnek. Zhang et al. (2024) arról számolnak be, hogy a megnövekedett CO₂-szint miatt „a száraz területek fokozódó szárazsága nem vezet a növényzet termőképességének általános csökkenéséhez”; a jelenleg száraz területeknek legfeljebb csak 4 százalékan fog fokozódni az elsivatagosodás.

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

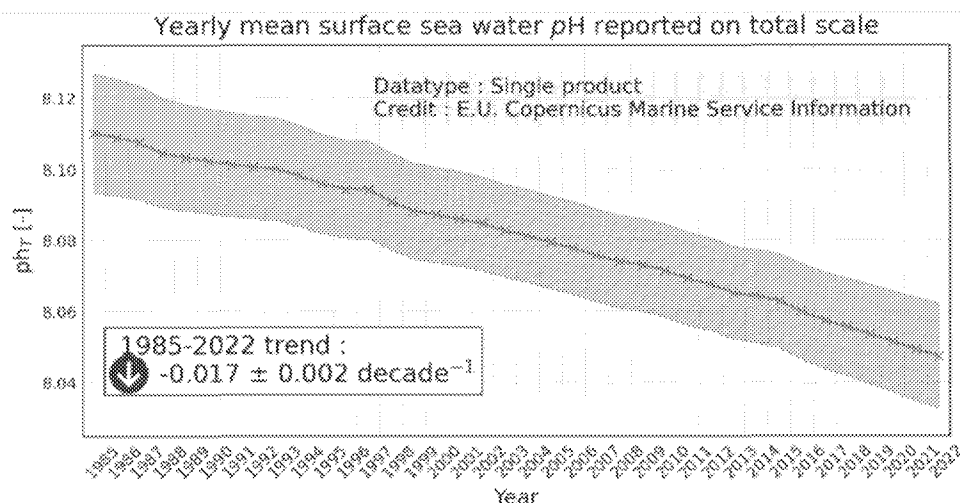
Az IPCC alig foglalkozik a globális zöldüléssel és a mezőgazdasági növények CO₂-trágyázásával. A téma röviden említésre kerül az IPCC 6. és korábbi értékelő jelentéseinek törzsében, de az összes összefoglaló dokumentumból kimarad. Az AR6 I. munkacsoport jelentésének 2.3.4.3.3. szakasza, melynek címe „Globális zöldülés és barnulás”, rámutat, hogy az IPCC klímaváltozásról és földhasználatról szóló különjelentése nagy bizonyossággal arra a következtetésre jutott, hogy a zöldülés az elmúlt 2-3 évtized során globálisan fokozódott. Ezután arra tér rá, hogy a zöldülési trendben eltérések vannak az adathalmazok között, és arra a következtetésre jut, hogy bár nagy bizonyossággal állítják, hogy zöldülés történt, a trend nagyságrendjét alacsony megbízhatóságúnak nevezik. Az AR6 I. és II. munkacsoport jelentéseinek néhány további fejezetében röviden megemlíti a CO₂-trágyázás hatásait és a vízfelhasználás hatékonyságának javulását.

Összességében elmondható azonban, hogy az AR5 és AR6 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalói, a technikai összefoglalók és a szintézisjelentések nem tárgyalják a témát.

2.2 A lúgos óceánok

2.2.1 A pH változása

A semleges vizes oldat pH-ja 7,0, míg a 7,0-nél nagyobb pH-jú oldat lúgos (más néven bázikus), a 7,0-nél kisebb pH-jú pedig savas. A felszíni tengervíz jelenkori globális átlagos pH-értékét 8,04-re becsülik (Copernicus Marine Service 2025, 2.3. ábra), szemben az iparosodás előtti időkben becsült 8,2-es értékkel (Gattuso és Hansson, 2011). Ahogy a légkör CO₂-koncentrációja emelkedett, az óceánok többet nyeltek el, ami csökkentette a pH-értéket. Az óceánok pufferkapacitásától függően várható, hogy idővel némileg kevésbé lesznek lúgosak, ami összhangban van a pH megfigyelt csökkenésével.

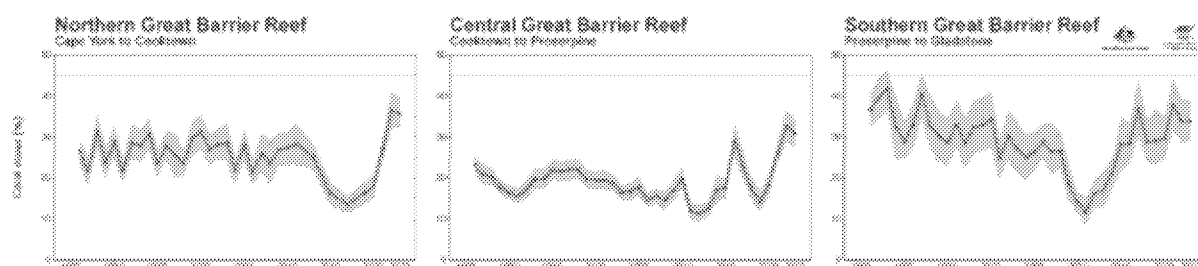


2.3 ábra: Óceáni pH 1985 – 2022. Forrás: Copernicus Marine Service 2025

E folyamatot gyakran „óceáni savasodásnak” nevezik, de ez félrevezető elnevezés, mivel az óceánok várhatóan nem válnak savassá; pontosabb lenne az „óceán semlegesítődése”. Ha a víz savassá válna, akkor is az a vélekedés, hogy az óceánokban az élet akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak, 6,5 és 7,0 közötti pH-értékkal (Krissansen-Totton et al., 2018). Több ezer éves időléptékben a bórízotóp-proxy mérések azt mutatják, hogy az óceán pH-értéke a legutolsó eljegesedés idején (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt) 7,4 vagy 7,5 körül volt, és a mai értékekre emelkedett, ahogy a világ az eljegesedés csökkenése során felmelegedett (Rae et al., 2018). Így az óceáni élőlények ellenállónak tűnnek az óceán pH-értékének természetes hosszú távú változásaival szemben, mivel a tengeri élőlények széles pH-tartománynak voltak kitéve.

2.2.2 Korallzátony-változások

Vannak aggodalmak arra vonatkozóan, hogy a tengervíz pH-értékének csökkenése csökkenti a korallzátonyok kalcifikációs (meszesedési) sebességét. A korallzátonyok azonban már most is nagy pH-ingadozásokat mutatnak, részben a zátonyban zajló napi fotoszintézis-aktivitás miatt; a mért pH-értékek a nappali 9,4-től éjszaka 7,5-ig terjedően változnak (Revelle és Fairbridge, 1957). De’ath et al. (2009) arról számol be, hogy Ausztrália Nagy-korallzátonyának (GBR, a világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája) egy részén 1990 óta 14 százalékos csökkenést tapasztaltak a meszesedésben. Ezt a víz hőmérsékletének emelkedésével és a pH csökkenésével igyekeztek magyarázni. Ridd et al. (2013) azonban kimutatta, hogy ez a jelentés egy elfogult adatelemzés eredménye, amely korrigálva nem mutatott változást a meszesedési arányban. Mindazonáltal az eredeti cikk által kiváltott riadalom továbbra is fennáll, amint azt az eredeti tanulmányra publikált hivatkozások nagy száma (541) is bizonyítja, szemben a javításra vonatkozó dolgozat mindössze 11 hivatkozával (2025. április 30-i állapot szerint). Az Ausztrál Tengertudományi Intézet legfrissebb éves GBR-körülmény-összefoglalója szerint a korallzátony-termékenység erőteljesen fellendült (AIMS, 2023). A 2.4. ábra az AIMS keménykorall-borításra vonatkozó felméréseinek eredményeit mutatja, a zátonyterület százalékában kifejezve. A GBR 2011 előtti csökkenésének nagy része az intenzív trópusi ciklontevékenységnak (Beeden et al., 2015), valamint egy sor tengeri hőhullámnak, mezőgazdasági lefolyásnak és invazív fajoknak tudható be (Woods Hole, 2023). Tekintettel a GBR-meszesedés 1990 és 2009 közötti csökkenésére és a légköri CO₂-szint folyamatos növekedésére, a fellendülés egyes megfigyelőket meglepett.



2.4 ábra: A keménykorall-borítás a Nagy korallzátony három régiójában 1985-től 2023-ig. Forrás: AIMS 2023.

Egyre inkább felismerik, hogy a publikációs torzítás (az óceáni savasodás riasztó eredményei, amelyeket a nagy hatású kutatási publikációk előnyben részesítenek) eltúlozza az óceáni pH-érték csökkenésének hatásait. Az ICES Journal of Marine Science különszáma ezt a problémát egy „Tágabb perspektíva felé az óceánsavasodási kutatásokról” című cikkben tárgyalta. A különszám bevezetőjében H. I. Browman kijelentette: „Ahogy az a tudomány egészére igaz, az olyan cikkeket, amelyek arról számolnak be, hogy az óceáni savasodásnak nincsenek hatásai, jellemzően nehezebb publikálni.” (Browman, 2016).

Hasonlóképpen, az óceáni savasodás zátonyhalak viselkedésére gyakorolt negatív hatásának metaanalízise (Clements et al., 2021) az úgynevezett „csökkenési hatást” találta: a neves folyóiratokban megjelent, kezdetben drámai következtetéseket, amelyek a savasodás látszólag nagy hatásait mutatták, általában nagyobb mintákon végzett későbbi tanulmányok követték, amelyek arról számoltak be, hogy a hatások sokkal kisebb és jellemzően nem is léteznek. Felszólítják kollégáikat, hogy fejlesszék kutatási gyakorlataikat a „hanyatlási hatás” ellensúlyozása érdekében:

E területen a jelentős hatást mutató tanulmányok túlnyomó többségét általában alacsony mintaelemszám jellemzi, mégis nagy impaktfaktorú folyóiratokban jelennek meg, és az idézettség tekintetében aránytalanul nagy szakterületi befolyásra tettek szert. Azt állítjuk, hogy az óceánok savasodásának a halak viselkedésére elhanyagolható közvetlen hatása van, és a jövőbeli kutatási területeken a hanyatlási hatás lehetőségének minimalizálása érdekében jobb megközelítéseket szorgalmazunk (Clements et al., 2021).

Összefoglalva, az óceáni élővilág összetett, és nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok a jelenlegihez képest savasabbak voltak. A modern korallak ősei először körülbelül 245 millió évvel ezelőtt jelentek meg. A CO₂-szint több mint 200 millió évvel később sokszor magasabb volt, mint ma. Az óceánok „savasodásának” a tengeri élővilágra gyakorolt hatásairól szóló nyilvános viták nagy része egyoldalú és eltúlzott volt.

Hivatkozások

AR6: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése (2021) I. Munkacsoport Hozzájárulása. www.ipcc.ch.

Ausztrál Tengertudományi Intézet. (2022). A korallzátonyok folyamatos regenerálódása 36 éves csúcsokat eredményezett a Nagy-korallzátony kétharmadán. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., és Williams, G. (2015). A Yasi súlyos trópusi ciklon hatásai és a felépülés a Nagy-korallzátonyon. PLOS ONE, 10, e0121272. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272>

Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: Kombinált modell a fanerozoikum légköri O₂ és CO₂ vizsgálatára. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5653–5664. 9

- Browman, H. I. (2016). Szervezett szkepticizmus alkalmazása az óceánok savasodási kutatásában. *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), 529.1–536. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., és Myneni, R. B. (2019). Kína és India vezető szerepet tölt be a világ zölddé tételében a földhasználat-gazdálkodás révén. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>
- Chen, X., Wang, Y., Liu, Y. és Piao, S. (2024). A globális zöldülés a 2000 óta fokozódó aszály okozta stressz ellenére is folytatódik. *Global Ecology and Conservation*, 49, e02791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P. et al. (2017). A szárazföldi szénmegkötés közelmúltbeli növekedése a víz körforgására gyakorolt kis költséggel. *Nature Communications*, 8, 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D. és Jutfelt, F. (2022). Metaanalízis extrém „csökkenési hatást” tár fel az óceáni savasodás halak viselkedésére gyakorolt hatásában. *PLOS Biology*, 20(2), e3001511. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511>
- Copernicus Marine Service. (2025). Globális óceáni savasodás – Az átlagos tengervíz pH-értékének idősorai és trendje több megfigyelés újrafeldolgozásból. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- De'ath, G., Lough, J. és Fabricius, K. (2009). Csökkenő korall-meszesedés a Nagy-korallzátonyon. *Science*, 323, 116–119. <https://doi.org/10.1126/science.1165283>
- Daryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... és Elliott, J. (2016). Regionális különbségek a növekvő CO₂-koncentráció jótékony hatásaiban a növényi vízhozamra. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Gattuso, J. P. és Hansson, L. (szerk.). (2011). Óceánok savasodása: Háttér és történelem. Oxford University Press.
- Gerhart, L. M., és Ward, J. K. (2010). Növények reakciói a múltbeli alacsony [CO₂]-szintre. *New Phytologist*, 188, 674–695. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402. <https://doi.org/10.1111/gcb.14950>
- Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, et al. (2023). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change* 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558-023-01867-2.
- Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., et al. (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 385(6715). <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 4105–4110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115>
- Piao, S., X. Wang, T. Park, et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x
- Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., et al. (2018). CO₂ storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. *Nature*, 562, 569–573. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0614-0>
- Revelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology* (Vol. 1). Geological Society of America.

- Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? *Marine Geology*, 346, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002>
- Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/>
- Zeng, Z., Piao, S. Li, L., et al. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate3299>

3 EMBERI ÉGHAJLATI HATÁSOK

Fejet-összefoglaló

A globális éghajlat minden időléptékben természet változások függvénye. Az antropogén CO₂-kibocsátás azáltal járul hozzá ehhez a változékonysághoz, hogy megváltoztatja a légkör teljes sugárzási energiaegyensúlyát.

Az IPCC lekicsinyli a Nap szerepét az éghajlatváltozásban, de léteznek olyan kézenfekvő napsugárzási rekonstrukciók, amelyek szerint a Nap hozzájárulhatott a jelenkori felmelegedéshez.

Az éghajlati előrejelzés („projekció”) az IPCC kibocsátási forgatókönyvein alapul, de ezek trendjei rendre meghaladják a megfigyeléseket. Az elmúlt évek legtöbb éghajlattudományi hatástanulmánya a szélsőséges RCP 8.5 forgatókönyvön alapul. Ezt ma már valószínűtlennek tartják; szokásos üzletmeneti forgatókönyvként való alkalmazása: félrevezető.

A szén ciklus-modellek az éves kibocsátást összekapcsolják a légköri CO₂-készlet növekedésével. A modellek ugyan ellentmondásosak a szárazföldi és óceáni CO₂-megkötés mértékével kapcsolatban, de abban mind egyetértenek, hogy a CO₂-megkötés 1959 óta növekedésben van.

Bizonyítékok léteznek arra, hogy a szárazföldi felmelegedési adatokban megmutatkozó városi torzítást az éghajlati adatsorokból nem távolították el teljes mértékben.

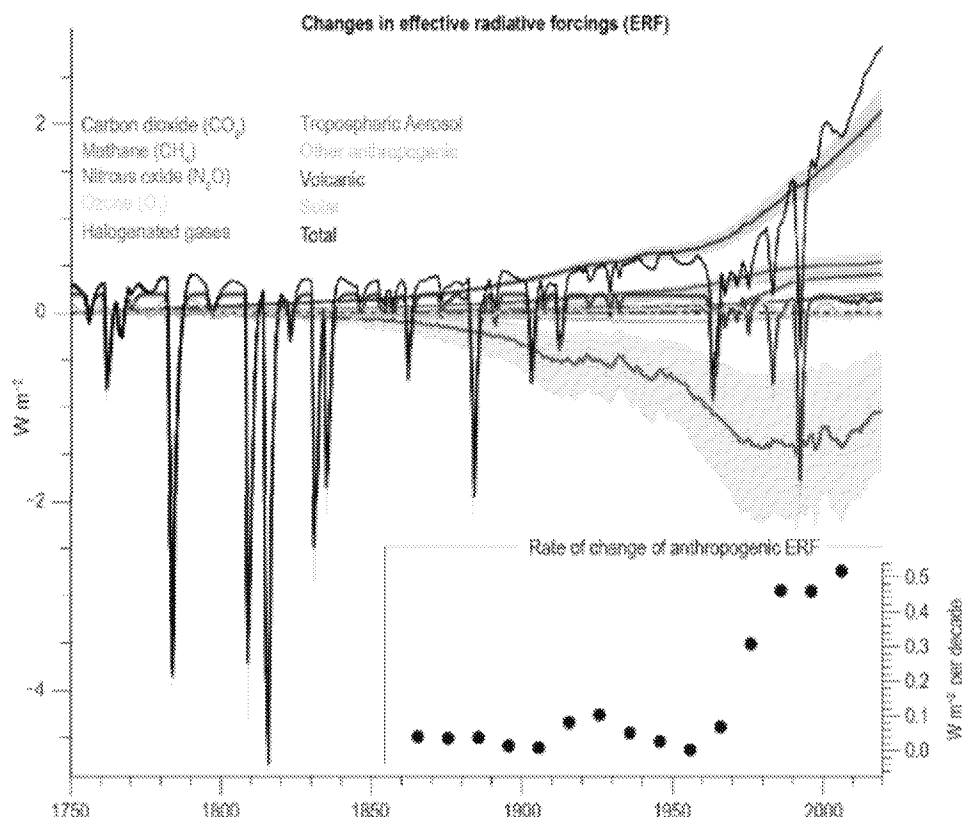
3.1 A sugárzási kényszer összetevői és történeteük

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

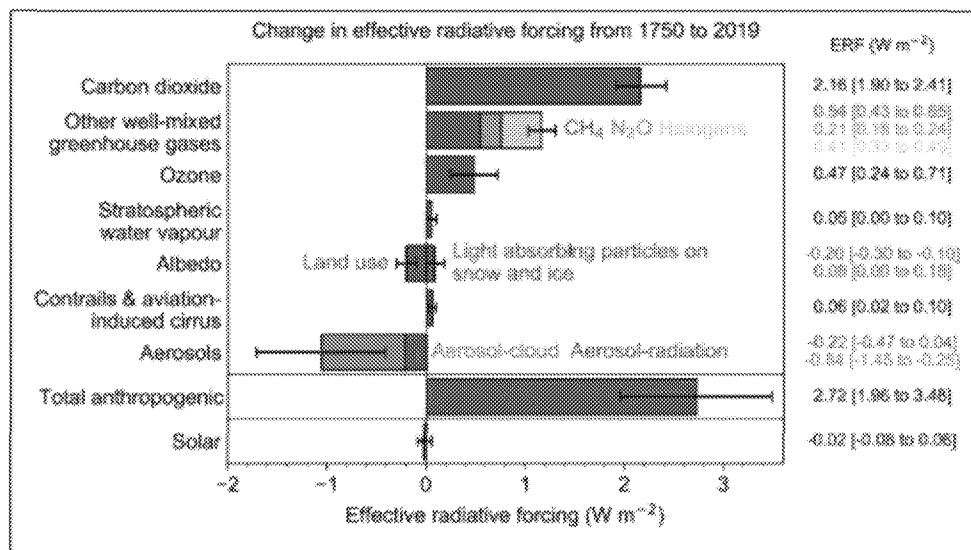
A Föld 4,6 milliárd éves történetében az éghajlatváltozás mindig is jellemző volt. A Föld hőmérséklete és időjárási mintázatai természetes módon változnak évtizedektől több millió évig terjedő időléptékben. A felszíni éghajlat természetes változásai kétféleképpen keletkeznek. A légkörben és az óceánban zajló cirkulációval összefüggő belső éghajlati ingadozások révén a légkör, az óceánok, a szárazföld és a jég között energia, víz- és szén-csere zajlik. Az éghajlati rendszerre gyakorolt külső hatások közé tartoznak a Naptól származó energia változásai és a vulkánkitörések hatásai. Az emberi tevékenységek a földhasználat és a föld befedése megváltoztatásával befolyásolják az éghajlatot. Az emberek a légkör összetételét is megváltoztatják a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásával, valamint a légkörben lévő aeroszolrészecskék koncentrációjának változtatásával.

A Földet az elnyelt napfény melegíti, és az űrbe kisugárzott hő hűti. A Föld felszínén átlagolva ezek a folyamatok körülbelül 240 watt/négyzetméter (W/m²) energiaáramlást jelentenek. Amikor egyensúlyban vannak, sem a felmelegedésnek, sem a lehűlésnek nincs nettó külső ok. Mind az emberi, mind a természetes éghajlati hatások megváltoztatják ezt az egyensúlyt, és így az éghajlat megváltozását okozzák.

A Föld légkörének tetején lévő energiaegyensúlyra gyakorolt hatásokat, azaz azt, hogy milyen mértékben keletkezik zavar a felmelegedés/lehűlés egyensúlyában, az ún. „sugárzási kényszer” számszerűsíti; a pozitív kényszer melegít, míg a negatív kényszer hűt. Az IPCC becsült adatai a sugárzási kényszer főbb összetevőinek 1750 óta tartó alakulásáról az AR6 itt bemutatott két ábráján látható.



3.1.1 ábra: A sugárzási kényszer összetevőire vonatkozó becslések időbeli változása. A sátozrás a bizonytalansági határt jelzi. Forrás: AR6 WGI 2. fejezet, 10. ábra



3.1.2. ábra: A sugárzási kényszer összetevőinek változása 1750-től 2019-ig az IPCC szerint. Forrás: AR6 WGI 7. fejezet, 7-6. ábra

E grafikonok azt mutatják, hogy a teljes sugárzási kényszer természetes és antropogén összetevőkből tevődik össze. Az éghajlatot az ember leginkább a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával, a szén-dioxiddal befolyásolja. Melegítő hatást fejt ki azért, hogy csökkenti a légkör hűtőerejét. A CO₂-kibocsátás felhalmozódik a légkörben, amint azt a következő szakaszban ismertetjük, így a felmelegítő hatás erősödik. Egyéb üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, halogének és ózon) hasonlóan hatnak, Így ezek együttesen a CO₂ által jelentett felmelegedéshez

képest további 75 százalékkal járulnak hozzá. Az aeroszolk összességében hűtő hatást fejtenek ki, bár nagy a bizonytalanság abban, hogyan működnek közre katalizátorként a fényvisszaverő felhők kialakulásában. Ennek eredményeként a jelenkori felmelegedés okainak megértéséhez nemcsak a CO₂ melegítő hatásainak azonosítása szükséges, hanem az aeroszolk bizonytalanabb hűtő hatásainak beazonosítása is.

Az IPCC a Nap sugárzási kényszerének változását elhanyagolhatónak becsüli, mivel az iparosodás előtti idők óta a csekély szoláris változást feltételező adatrekonstrukciókat részesítik előnyben. Connolly et al. azonban (2021) a szakirodalomból az 1600-2000 közötti évekre vonatkozóan tizenhat különféle teljes napbesugárzási (TSI) rekonstrukciót gyűjtött össze; a rekonstrukciók a TSI alig változó állapotától egy viszonylag erősen emelkedő tendenciáig terjednek. A szerzők megjegyzik, hogy a TSI-változás és a felszínhőmérséklet-változás rekonstrukcióinak kombinációja lehetővé tesz olyan következtetéseket, ami azzal a feltételezéssel vannak összhangban, hogy a 20. századi felmelegedés egyáltalán nem tulajdonítható a Napnak, de olyat is, hogy nagyrészt a Napnak tulajdonítható.

Különösen nehéz kérdést vet fel a TSI 1989 és 1991 közötti adathiánya, amely egy megfigyelőeszköz felbocsátásának a Challenger űrrepülőgép 1986. január 28-i katasztrófája miatti késedelem folyománya. E késés megakadályozta, hogy a korábbi felváltó új műholdat idejekorán felbocsássák annak érdekében, hogy az előző rendszerrel időben átfedő adatokat szolgáltatson, és a két adatsort egymással hitelesíteni lehessen (Zacharias 2014, Scafetta et al. 2019). Ez az ún. ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) hézagprobléma. Az ugyanis, hogy van-e emelkedő tendencia a TSI-ben 1978 és 2018 között, attól függ, miként pótolják az ACRIM adathiányát. Connolly et al. (2021) megállapította, hogy az IPCC konszenzusos nyilatkozatait a napsugárzási kényszerrel az eltérő tudományos vélemények elnyomásával idő előtt fogalmazták meg.

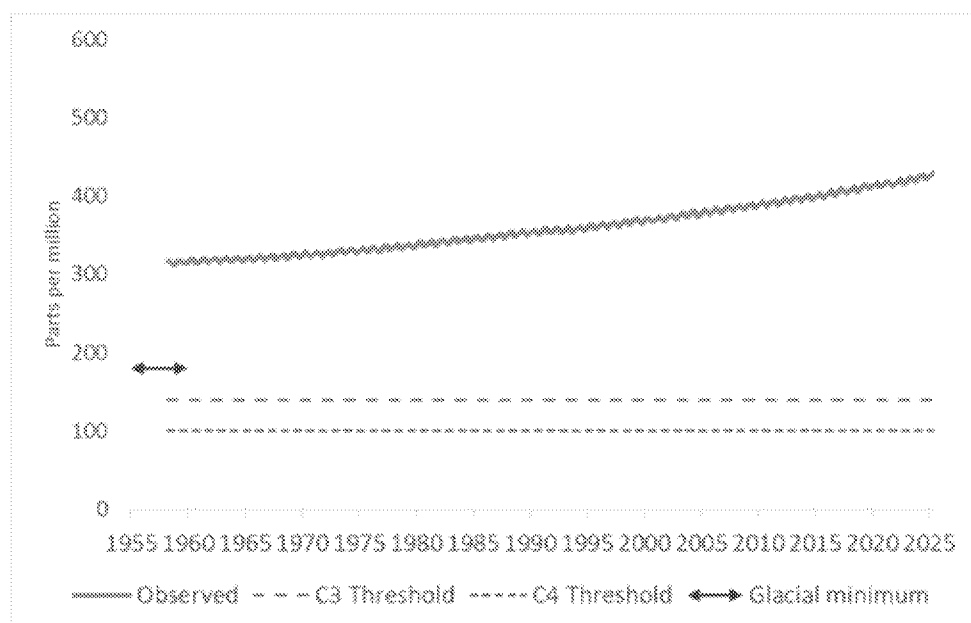
A sugárzási kényszer egy másik természetes összetevőjét az időnkénti hűtőhatást kifejtő vulkáni aeroszolk jelentik. Az IPCC AR6 jelentés 4.1. tudásdoboz a vulkánkitörések éghajlati hatásával foglalkozik, megemlítve három robbanásszerű vulkánkitörést, amelyek a 19. század első felében történtek. Ezek közé tartozott az 1815-ös Tambora-kitörés, ami a „nyár nélküli évet” eredményezte, és az északi féltekén számos termés kieséssel járt. Bizonytalanság van a 2022-ben kitört Hunga Tonga tengeralatti vulkán által jelentett viszonylag kis sugárzási kényszer előjelével kapcsolatban is (Jenkins et al., 2023, Schoeberl et al., 2024).

A 3.1.1. ábra azt mutatja, hogy a sugárzási kényszer antropogén összetevője 1900 előtt elhanyagolható volt, azóta pedig folyamatosan növekszik, mára közel 3 W/m²-re emelkedett. Ez azonban még mindig csak körülbelül 1 százaléka a zavartalan sugárzási áramnak, ami megnehezíti az antropogén kényszer hatásának elkülönítését; a globális sugárzási energiaáramot a legmodernebb műholdakkal is csak néhány W/m² pontosságban lehet megbecsülni.

A vulkánkitöréseken és a teljes napsugárzáson (TSI) kívül a globális energiaegyensúlyban eltérést okozó egyéb természetes források ezeken a grafikonokon nem szerepelnek, mivel azok nagyrészt ismeretlenek.

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

A szén-dioxid felmelegítő hatása attól függ, hogy mennyi CO₂ többlet halmozódik fel a légkörben – azaz mennyivel haladja meg a koncentráció az iparosodás előtti 280 ppm-nyi értéket. A hawaii Mauna Loa obszervatóriumában megfigyelt CO₂-szint, amit általában reprezentatív globális átlagos koncentrációként használnak, online elérhető a <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html> címen. A koncentráció a megfigyelés kezdetén, 1959-ben körülbelül 316 ppm volt, és most körülbelül 430 ppm, ami 36 százalékos növekedést jelent. A legutóbbi eljegesedési maximum végére a CO₂-szint körülbelül 180 ppm-re csökkent. Amint azt a 2. fejezetben tárgyaltuk, a C3 növények körülbelül 140 ppm alatti CO₂-szintnél, a C4 növények pedig 100 ppm alatti szinten kezdenek el pusztulni, így a CO₂-szint tovább csökkenése esetén a növényi élet veszélybe került volna.



3.1.3. ábra: A CO₂-koncentráció éves átlagértékének alakulása (1995-2025) ppm-ben, a Mauna Loa-megfigyelés szerint (kék). C3 küszöb: az a szint, ami alatt a C3 növények kezdenek elpusztulni (140 ppm, ld. 2. fejezet). C4 küszöb: Az a szint, ami alatt a C4 növények kezdenek elpusztulni (100 ppm, ld. 2. fejezet). Glaciális CO₂-minimumszint: a jelenlegi jégkorszak legkisebb CO₂-koncentrációja (lila nyíl). CO₂-adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

3.2 Jövőbeni kibocsátási forgatókönyvek és a szénciklus

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

A jövőbeni ÜHG-kibocsátás veszélyeinek felméréséhez feltételezésekre van szükség arról, hogy mekkora lesz a kibocsátás. A jövőbeli kibocsátás, és így az emberi hatás az éghajlatra egyaránt függ a jövőbeni demográfiai változásoktól, a gazdasági tevékenységtől, a szabályozástól, valamint az energia- és mezőgazdasági technológiáktól. Az ezek mindegyikére vonatkozó egyes feltételezésekből következtetnek az üvegházgáz-kibocsátásra és légköri koncentrációjukra, az aeroszolkoncentráció és a földhasználat változások előrejelzéseire, amiket végső soron kombinálni lehet az antropogén sugárzási kényszerre vonatkozó feltételezésekkel.

A számos tényező mindegyikével kapcsolatos nagy bizonytalanság lehetetlenné teszi a jövőbeli kibocsátás pontos előrejelzését. Ehelyett az IPCC különféle forgatókönyv-készleteket használ. Ezeknek az a célja, hogy felöleljék a népesség, a gazdaság és a technológiák kézenfekvő lehetőségeinek széles skáláját. A forgatókönyvek legújabb verzióit egy szám jelöli, amely az adott forgatókönyv szerint 2100-ban várható antropogén sugárzási kényszert jelzi. Így a „6”-ossal jelölt forgatókönyv 6 W/m² ember által okozott sugárzási kényszernek (felmelegedésnek) felel meg a század végén. (Emlékezzünk vissza, hogy a jelenlegi antropogén sugárzási kényszer körülbelül 2,7 W/m².)

Bár az IPCC nem állítja, hogy kibocsátási forgatókönyvei előrejelzések, gyakran annak kezelik őket. A múltbeli forgatókönyv-csoportok és a megfigyelések összehasonlítása azt mutatja, hogy az IPCC kibocsátási előrejelzései hajlamosak voltak túlbecsülni a tényleges későbbi kibocsátásokat. Az IPCC harmadik és negyedik értékelő jelentéséhez a kibocsátási forgatókönyvekről szóló különjelentésből származó kibocsátási előrejelzések halmazát használták; ezeket SRES-forgatókönyveknek nevezték. McKittrick et al. (2012) kimutatták, hogy az egy főre jutó értékekre

átszámítva a SRES-forгатókönyv kibocsátás-clozslása a megfigyelt trendekhez képest felfelé torzít. A SRES-forгатókönyvek torzítását megerősítette Hausfather et al. (2019) későbbi elemzése is. Ők azt mutatták ki, hogy a megfigyelt légköri CO₂-koncentráció a SRES-tartomány, valamint a későbbi IPCC-forгатókönyvek tartományainak alsó határát követték (3.2.1. ábra).

Az AR5-höz az IPCC egy új forгатókönyv-készletet dolgozott ki, amelyet reprezentatív koncentrációs útvonalaknak (RCP) neveznek. Ezeket egy olyan számmal azonosították be, amely a kényszererő növekedését jelenti, és így nevezték el őket RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5 néven. Az RCP2.6 (amely 2100-ban 2,6 W/m² antropogén sugárzási kényszert jelent) egy olyan üvegházhatású gázkoncentrációs útvonalat ír le, ami jóval 2°C alatti felmelegedéshez vezet. A skála másik végén az RCP8.5 egy szélsőséges eredmény, ami 1900 és 2100 között közel 5°C-os felmelegedést jelent.

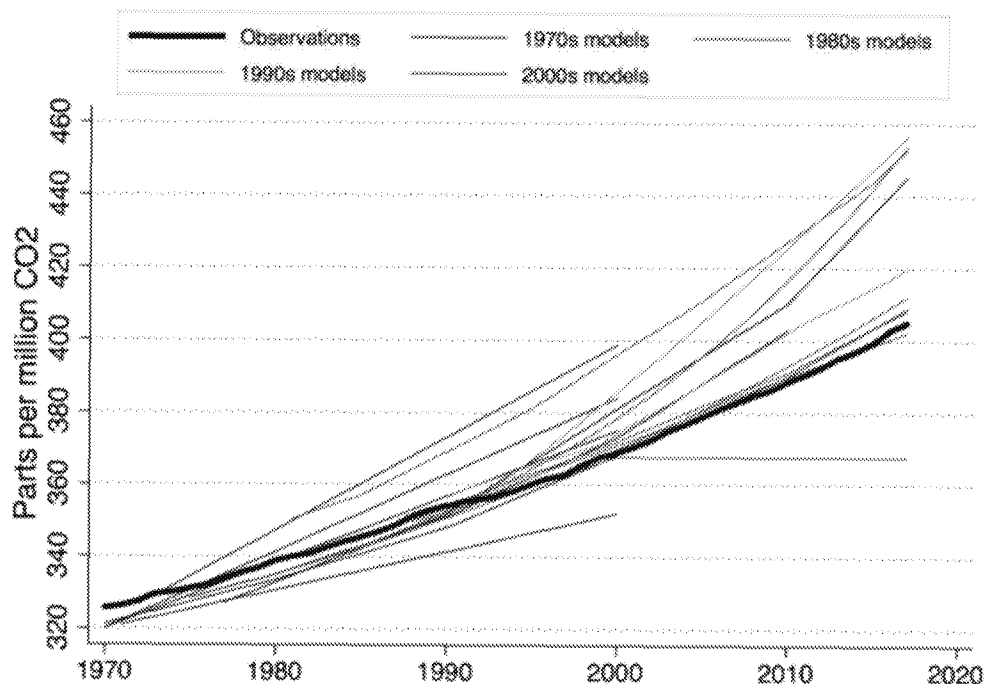
Mind a tudományos irodalomban, mind a népszerű médiában az RCP8.5-öt kezdték a klímapolitika nélküli, vagyis a „szokásos üzletmeneti” forгатókönyvként emleget. Ezért használták fel egy olyan referenciaeredmény generálására, amely az állítás szerint egy egyre szigorúbb kibocsátáscsökkentési politika nélküli 21. századi világot jelenít meg. Az RCP8.5 forгатókönyvet azonban egy alacsony valószínűségű, magas kibocsátású forгатókönyvnek szánták, és a szokásos üzletmenet alapjául szolgáló forгатókönyvként való használatát súlyosan félrevezetőnek minősítették.¹ Hausfather és Peters (2020a) a Nature folyóiratban megjelent kommentárjukban rámutattak, hogy az RCP8.5 forгатókönyvet egy szélsőségesen legrosszabb esetként dolgozták ki, és a „szokásos üzletmenet” alapjául való helytelen használata számos félrevezető tanulmányhoz és médiabeszámolóhoz vezetett.

Az RCP8.5 forгатókönyv valószínűtlenségét Burgess et al. (2021) részletes vizsgálatnak vetette alá. Az RCP8.5 valószínűtlenségét nem szabad *nagyon valószínűtlennek* (pl. 95. percentilisnek) vagy „legrosszabb esetnek” tekinteni, hanem inkább valóban valószínűtlennek, mivel a 8,5 W/m²-es kényszerhez szükséges bemenetek igen valószínűtlenek. Megjegyezték, hogy az RCP8.5 máris eltért az energiafelhasználás megfigyelt trendjétől, és a közeli jövőre vonatkozó trend élesen eltér a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) trendjétől, ami az elkövetkező évtizedekre piaci alapú energiafelhasználási előrejelzéseket ad. Pielke Jr. et al. (2022) kimutatta továbbá, hogy az IEA történelmi és előrejelzési trendjei az alján helyezkednek el mind az RCP-előrejelzések, mind a frissebb Megosztott Társadalmi-gazdasági Útvonal (SSP) forгатókönyv alsó burkológörbéinek.

Schwalm et al. (2020) azzal védtek az RCP8.5 használatát, hogy a 2005–2020 közötti kumulatív CO₂-kibocsátás inkább követi ezt, mint az alacsonyabb RCP-forгатókönyveket. Azt is állítják, hogy az elkövetkező évtizedekben az IEA-forгатókönyvek módosított változata szorosan követi az RCP8.5-öt. Hausfather és Peters (2020b) válaszukban azt mondták, hogy az RCP8.5 képessége az említett 15 évben az üzemanyag-felhasználásból és a földhasználat-változásból eredő CO₂-reprezentációban előforduló hibák eltüntetésének következménye, és az IEA-val való látszólagos egyezés az elkövetkező évtizedekben Schwalm et al. érdeme, akiknek a földhasználati kibocsátásra túl magas járulékos tényezőt vezettek be. Az IEA saját előrejelzett CO₂-kibocsátása jóval alatta marad az RCP8.5-nek.

Az RCP8.5 széles körű, szakpolitikai kiindulási alapként való használata aggodalomra okot adó tendenciát teremtett az éghajlatváltozás hatásaival foglalkozó szakirodalomban. A probléma mértékét Pielke Jr. és Ritchie (2020) szakirodalmi elemzése is megerősítette. Megállapították, hogy 2010 és 2020 között mintegy 16 800 tudományos cikk alkalmazta az RCP8.5 forгатókönyvet, amelyek közül körülbelül 4500 az „üzletmenet a szokásos módon” koncepciójához kötötte az RCP8.5-öt. Elemzésük kimutatta, hogy az RCP8.5-öt nemcsak az egyes kutatók használták rosszul, hanem olyan befolyásos tudományos ügynökségek is visszaéltek az RCP8.5-tel, mint az IPCC és az Egyesült Államok Nemzeti Éghajlatváltozási Értékelése (USNCA). Mindez a fősodratú médiában azon nyomban félrevezető tudósításokhoz vezetett.

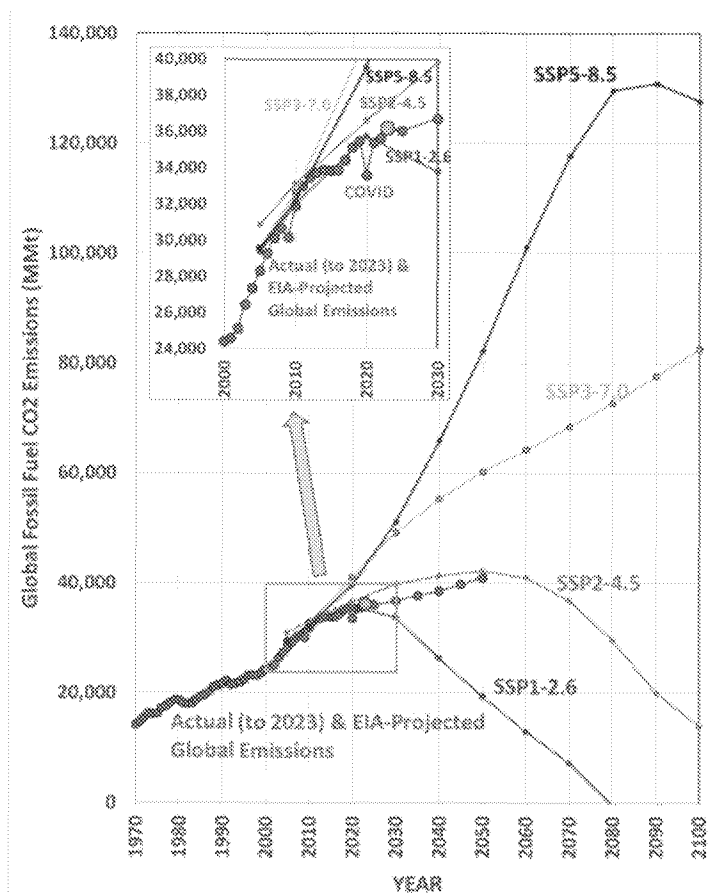
¹ Ez a szélsőséges forгатókönyv hasznos a modellezők számára, ugyanis ha a kényszerítő tényező nagy, az nagy választ (felmelegedést) generál, ami megkönnyíti a modell érzékenységeinek felmérését. De ez egészen más, mint azt állítani, hogy ez egy valószínű jövőbeli kimenetel.



3.2.1 ábra: AZ 1970-es évek óta az kibocsátásra és a koncentrációra vonatkozó, egymást követő előrejelzések (színes vonalak) következetesen túlbecsülték a méréseket (fekete vonal). Forrás: Hausfather et al. (2019) S4. ábra

Pielke és Ritchie (2020) arról számoltak be, hogy az RCP8.5-öt használó új tanulmányok száma napi 20 volt, amelyek közül körülbelül napi kettő kifejezetten összekötötte az RCP8.5-öt és a „szokásos üzletmenetet”. Arra a következtetésre jutottak, hogy az klímakutató közösség egy teljes évtizedet töltött azzal, hogy „tudományos erőforrásokat sci-fi”, és hogy „a tudományos szakirodalom apokaliptikus irányban kiegyensúlyozatlanná vált”.

Az IPCC új forgatókönyveket dolgozott ki az AR6-hoz, a „Megosztott társadalmi-gazdasági út” (SSP) forgatókönyveket, amelyekben az RCP és SRES forgatókönyvekben mutatott torzítás tovább folytatódott. A 3.2.2. ábra a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által összeállított teljes globális megfigyelt CO₂-kibocsátást mutatja, egyesítve az IEA kibocsátási előrejelzésével, figyelembe véve az energiafelhasználási előrejelzéseket és a jelenlegi politikákat. A többi vonal az IPCC SSP-forgatókönyveinek tartományát (SSP1-SSP5) mutatja. 2023-tól a globális CO₂-kibocsátás jóval az SSP7.0 alatt maradt, sőt az SSP2-4.5-nek is alá került.



3.2.2. ábra: Megfigyelt és előrevetített CO₂-kibocsátás. Forrás: IPCC (SSP scenáriók) és Energy Information Administration (EIA). Zöld: megfigyelt történelmi kibocsátás és az EIA előrejelzése. Egyéb vonalak: SSP1-5. Adatforrás: Friedlingstein et al. (2024).

3.2.2 A kibocsátásokhoz és a koncentrációkhoz kapcsolódó szén ciklus

A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből (valamint kisebb mértékben az erdőirtásból és a cementgyártásból) származó szén-dioxid-kibocsátás a légkör CO₂-koncentrációjának folyamatos emelkedéséhez vezetett, amint azt a 3.1.3. ábra mutatja. A kibocsátások és a koncentráció közötti kapcsolatot a szárazföldi és óceáni folyamatok globális szén ciklusa határozza meg, amelyek során a légkörrel szén-csere történik. E folyamatok megértéséhez Crisp et al. (2021) segített hozzá.

A Föld légkörében körülbelül 850 Gt szén (GtC) található², szinte teljes egészében CO₂ formájában. Ebből a szénből a biológiai folyamatok (növényi növekedés és -lebomlás) és a fizikai folyamatok (óceáni abszorpció és gázkibocsátás) évente körülbelül 200 GtC-t cserélnek ki a Föld felszínével (nagyjából 80 GtC-t a kontinensekkel és 120 GtC-t az óceánokkal). Mielőtt az emberi tevékenység jelentőssé vált, a légkörből való kivonódás nagyjából egyensúlyban volt a hozzáadódással.

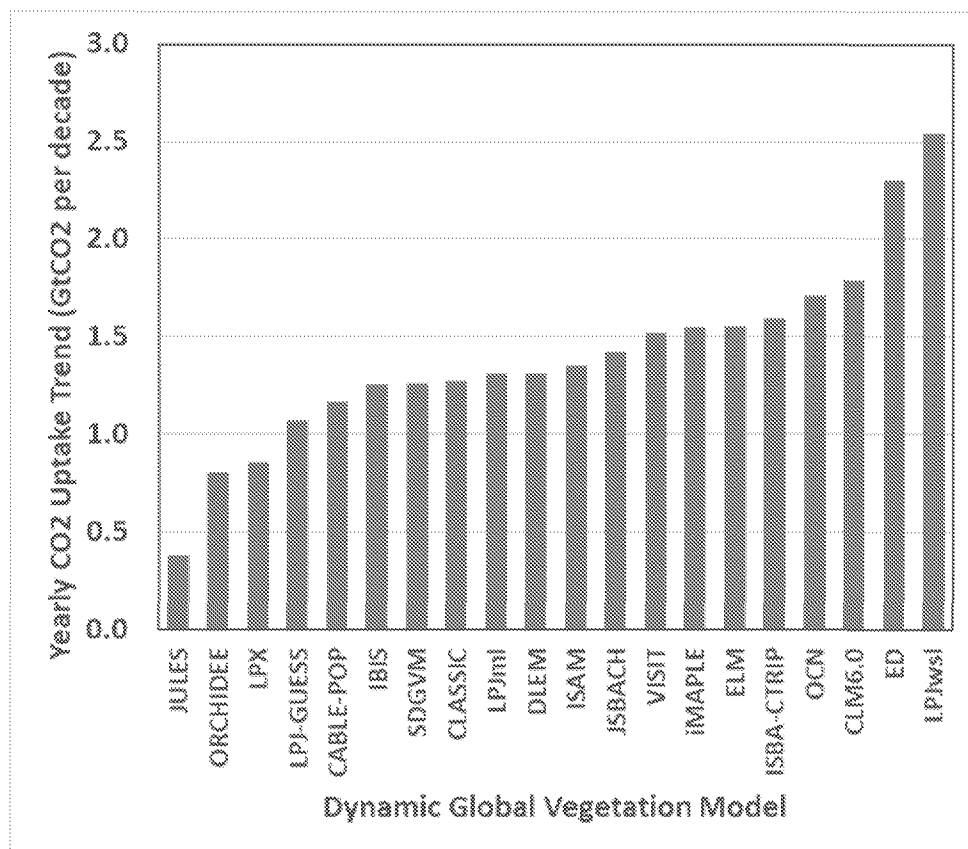
A fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj és gáz) elégetése azonban kivonja a szenet a talajból, és hozzáadja azt a légkörrel történő évi cseréhez. Ez a többlet (a cementgyártás sokkal kisebb hozzájárulásával együtt) 2023-ban 10,3 GtC-t tett ki, ami a légkörrel végbement éves csere mindössze 5 százaléka.

² Mivel a CO₂ a szén ciklus során kémiaiilag átalakul, kényelmesebb a CO₂ molekulái helyett a szénatomokat nyomon követni. Egy gigatonna szén (GtC) körülbelül 3,7 Gt CO₂-nek felel meg.

A szén ciklus az emberiség kis éves szén-dioxid-befecskendezésének körülbelül 50 százalékát teszi ki azáltal, hogy azt a növények növekedése és az óceáni felvétel természetes módon megköti, míg a fennmaradó rész felhalmozódik a légkörben (Ciais et al., 2013). Emiatt a légköri CO₂-koncentráció éves növekedése átlagosan csak körülbelül a fele annak, amit az emberi kibocsátásokból naivan váránk. A légkör jövőbeli CO₂-koncentrációjának, és így az éghajlatra gyakorolt jövőbeli emberi hatásoknak az előrejelzéséhez fontos tudni, hogy a jövőben miként változhat a szén ciklus. Az 50 százalékos arány történelmileg közel állandósága azt jelenti, hogy minél több CO₂-t termelt az emberiség, annál gyorsabban távolította el a természet a légkörből. Ez az 50 százalékos arány az El Niño, a La Niña és a változó időjárási mintázatok okozta természetes szén ciklus-egyensúlyhiányok miatt évről-évre némileg változik. A Pinatubo-hegy 1991-es kitörése után a légköri CO₂ mennyisége is jelentősen csökkent, ami egy érdekes eredmény, és ezidáig még nem sikerült megmagyarázni (Angert et al., 2004). A légkörből a felesleges CO₂-t eltávolító fő folyamatok közé tartozik a szárazföldi növényzet fokozott növekedése (különösen a magas földrajzi szélességeken), a talaj szénmegkötésének némi növekedése, valamint az óceán általi CO₂-felvétel a légköri CO₂ parciális nyomásának növekedése miatt az óceánban oldott CO₂ nyomásához képest. A Globális Szén Projekt (Friedlingstein et al., 2024) által nyomon követett mind a húsz szárazföldi szén ciklus-modell azt mutatja, hogy a szárazföldi folyamatok 1959 óta egyre növekvő ütemben vonják el a felesleges CO₂-t. Ez összhangban van az 1982 óta műholdakkal megfigyelt „globális zöldülés” jelenségével (2.1. fejezet). Míg a szárazföldi növényzet pozitívan reagál a légköri CO₂-többletre, az óceáni biológiai folyamatok általi többlet CO₂-felvétele túl bizonytalan ahhoz, hogy megbízhatóan mérhető legyen. Az itt leírt ismeretek és számos további szén ciklus-folyamat leírása Crisp et al. (2021) összefoglalójában található.

CO₂-felvétel szárazföldi folyamatok által

A légkörből származó többlet CO₂ szárazföldi felszíni folyamatok általi felvételét (ahogyan azt a globális zöldülésből is következtetjük) 20 különféle dinamikus globális vegetációs modellel modellezték, amelyek eredményeit a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. Amint a 3.2.3. ábrán is látható, ezek a modellek egyetértenek abban, hogy a növényzet és a talaj megköti a szén a légkörből. Azt is látjuk azonban, hogy az 1959 és 2023 közötti (65 év) hosszú távú trendekben a modellek nagymértékben (közel hétszeres szorzótényezővel) különböznek egymástól. Mindez azt mutatja, hogy továbbra is jelentős bizonytalanság van abban, hogy a szárazföldi folyamatok milyen gyorsan távolítják el a CO₂-t a légkörből, ami viszont bizonytalanságot szül a jövőbeli légköri CO₂-koncentrációt illetően, ami pedig bizonytalanná teszi a jövőbeli éghajlatváltozás klíma-modell-szimulációit is.

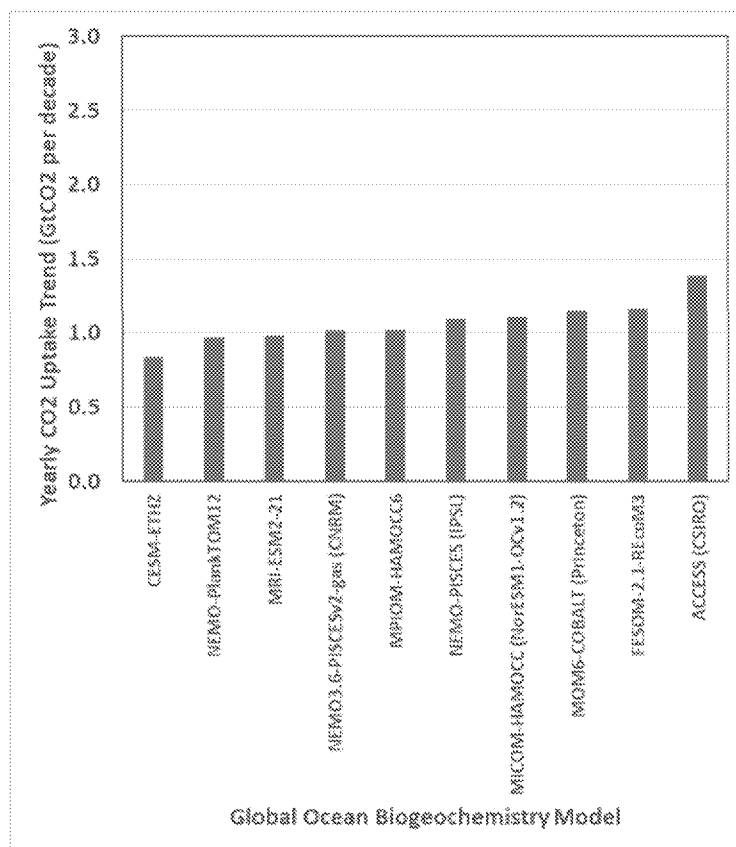


3.2.3 ábra: Szárazföldi folyamatok általi éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) 1959-2023 között, 20 különféle dinamikus globális vegetációmodell, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

CO₂-felvétel óceáni folyamatok által

Az óceáni folyamatok légkörből történő többlet CO₂-felvételét 10 különböző óceáni biogeokémiai modell segítségével modellezték. Az eredményeket a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. A szárazföldi modellek eredményeihez hasonlóan az összes óceáni modell egyetért abban, hogy a globális óceánok 1959 és 2023 között egyre nagyobb ütemben vontak ki szén a légkörből (3.2.4. ábra). A szárazföldi modellekkel ellentétben azonban az óceáni modellek sokkal jobb egyezést mutatnak egymással, a leggyorsabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell mindössze 65 százalékkal gyorsabb, mint a leglassabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell. A modellek közötti relatív egyezés ellenére Friedlingstein et al. (2022) megjegyzi, hogy az elmúlt évtizedben jelentős eltérés mutatkozik a különböző módszerek között az óceáni elnyelődés erősségét illetően, különösen a Déli-óceánon (az Antarktiszi-óceánon).

Megjegyzendő, hogy a 3.2.3. ábrán látható összes szárazföldi modellben a CO₂-felvétel átlagos trendje 25 százalékkal nagyobb, mint az óceáni felvétel átlagos trendje. Ez arra utal, hogy a szárazföldi folyamatok gyorsabban képesek a levegőből eltávolítani a CO₂-t, mint az óceáni folyamatok.



3.2.4 ábra: Az éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) az óceáni folyamatok által 1959-2023 között, 10 különféle dinamikus globális biogeokémiai modell, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

3.3 Az urbanizáció hatása a hőmérsékleti trendekre

A szárazföldi történelmi hőmérsékleti adatokat főként ott gyűjtötték, ahol emberek élnek. Ez felveti azt a problémát, hogy hogyan lehet kiszűrni a városi hőszigetek (UHI) és a kontinensfelszín egyéb változásai miatt jelentkező nem éghajlatváltozás-eredetű felmelegedési jeleket. Ha ezeket nem távolítják el, az adatok túlzott mértékben tulajdoníthatják üvegházhatású gázoknak a megfigyelt felmelegedést. Az IPCC elismeri, hogy a nyers hőmérsékleti adatok UHI-hatásokkal szennyezettek, de azt állítja, hogy rendelkeznek olyan adattisztítási eljárásokkal, amelyek ezeket eltávolítják. Nyitott kérdés, hogy ezek az eljárások megfelelőek-e.

Az AR6 elbagatellizálta ezt a problémát azzal, hogy (WGI 235. o.) azzal, hogy nem merült fel újabb bizonyíték, amely megváltoztatná az AR5 megállapítását, miszerint az urbanizáció a globális szárazföldi felszín felmelegedési trendjében legfeljebb 10 százalékos felfelé irányuló torzítást okoz. Az AR5 (WGI 189. o.) szintén a 10 százalékos felső határt idézte, forrásmegjelölés nélkül. Az AR4 (WGI 244. o.) az állítás alapjául Jones et al. (1990) és Peterson et al. (1999) munkáira hivatkozott. Peterson et al. nem találtak különbséget a vidéki és a városi minták közötti trendekben, bár a „vidék”-re vonatkozó definíciójuk az volt, hogy a lakosság száma legfeljebb 10 000 fő, míg az urbanizáció relatív hatása jóval ez alatt elkezdődik (Spencer et al., 2025). Jones et al. a vidéki/városi felmelegedést három régióban hasonlította össze: Kelet-Ausztráliában, Kelet-Kínában és a Szovjetunió nyugati részén. „Vidék” definíciójuk a volt Szovjetunióban legfeljebb 10 000 lakosság volt, míg Kínában legfeljebb 100 000. Ezeken a területeken 10 százaléknál nagyobb relatív felmelegedési torzítást találtak, de azt feltételezték, hogy az általuk nem vizsgált területek átlagolt urbanizációs hatása a globális szárazföldi torzítást a megfigyelt felmelegedési trend 10 százaléka alá csökkentené.

Az IPCC AR4 előtt számos tanulmány jelent meg nyomtatásban, amelyek azt állították, hogy az UHI-k felmelegedési hatása a megfigyelt felmelegedéshez viszonylag nagy (30–50%-os) hozzájárulást adott, és ez a klímamodell-szimulációkból kimaradt (de Laat és Maurellis 2006, McKittrick és Michaels 2007). Ezek az eredmények a szárazföldi maximális felmelegedés helyszínei és a maximális társadalmi-gazdasági fejlődés helyszínei közötti korreláción alapultak. Az AR4 jelentés (244. o.) azt állította, hogy ezek a korreláció a természetes légköri cirkuláció műterméke, és valójában statisztikailag jelentéktelen, és ezen az alapon eltekintett az eredmények figyelembevételétől. Ez az állítás vitatható, mivel nem mutattak fel semmiféle bizonyítékot. McKittrick (2010), valamint McKittrick és Nierenberg (2010) kimutatták, hogy a korrelációra vonatkozó különféle alternatív magyarázatok nem befolyásolják a korreláció jelentőségét. Az AR5 jelentés (189. o.) elismerte, hogy az AR4 „nem szolgáltatott explicit bizonyítékot” az értékeléshez, és ezen dokumentumok alapján elismerte, hogy „jelentős bizonyíték van az adatok ilyesféle szennyeződésére”, azaz a szárazföldi adatokban felmelegedési torzításra utal. Azonban, ahogy már említettük, az AR5 jelentés többi részében fenntartották az AR4 állítását, miszerint ez a megfigyelt felmelegedés kevesebb mint 10 százaléka. Továbbá nem adtak figyelmeztetést a szárazföldi adatok éghajlati mérésekre való felhasználásával kapcsolatban, annak ellenére, hogy elismerték az UHI szennyeződés bizonyítékait. Nemrégiben Soon et al. (2023) azt becsülte, hogy az északi félteke szárazföldi hőmérsékletváltozási adataiban az 1850–2018 közötti urbanizációs torzítás elegendő volt ahhoz, hogy a kevert (városi+ vidéki) adatok trendje évszázadonként 0,55°C-ról 0,89°C-ra növekedjen.

Néhány, az UHI szennyezés ellen bizonyítékot nyújtó tanulmány összehasonlította a vidéki és városi helyszínek felmelegedési ütemét (Jones et al. 1990, Peterson et al. 1999, Wickham et al. 2013). Nem ismert, hogy az efféle módszerek képesek lennének-e kimutatni az UHI torzítást akkor is, ha az jelen van. Az UHI felmelegedés hatása a népesség függvényében logaritmikusan viselkedik, más szóval kis népsűrűség esetében a legerősebb, majd a helyi urbanizáció kiterjedésével egyenletesebb lesz (Oke 1973, Spencer et al. 2025). Ezért az, hogy nem találtak különbséget a városi és vidéki állomások felmelegedési ütemében, nem bizonyítja az UHI szennyezés hiányát. McKittrick (2013) empirikus bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy a vidéki/városi trend egy olyan adathalmazban, amelyről más alapon kimutatták, hogy UHI torzítással szennyezett, nem különbözik szignifikánsan egymástól.

Parker (2006) városi helyszínekből vett minták vizsgálatával a trendekben nem talált eltérést az éjszakai szélsőbesség szerint felosztott részhalmozok között, és ennek alapján arra a következtetésre jutott, hogy az urbanizáció nem lehet szignifikáns tényező. Itt ismét az a kérdés, hogy egy ilyen módszer kimutatná-e az UHI torzítását, még ha jelen is lenne. McKittrick (2013) bemutatott egy olyan példát, amelyben az UHI-val szennyezett adatok nem mutattak szignifikáns trendkülönbségeket a szélsőbesség szerinti csoportosítás alapján.

Az UHI torzítás mérésének kihívása az, hogy a helyi hőmérsékletváltozást a népesség vagy az urbanizáció megfelelő változásához kellene kötni, és nem egy statikus osztályozási változóhoz, például ahhoz, hogy vidéki vagy városi. Spencer et al. (2025) egy ilyen elemzés elvégzéséhez újonnan elérhető történelmi népességi archívumokat használt fel, és az amerikai nyári hőmérsékleti adatokban jelentős UHI torzításra talált bizonyítékot.

Összefoglalva: a szárazföldi hőmérsékleti megfigyelésben ugyan egyértelműen kimutathatóak felmelegedésből adódó változások, arra is utalnak bizonyítékok, hogy az urbanizációs mintázatok e tendenciát felfelé torzítják, és hogy ezeket a torzításokat az éghajlati adatkészletek előállításához használt adatfeldolgozó algoritmusok nem szüntették meg teljesen.

Hivatkozások

Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO2 seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. *Geophysical Research Letters* 31.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019760>

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2013) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2007) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Burgess, Matthew et al (2021) *Environmental Research Letters* 16 014016
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcd2/meta>
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate *Research in Astronomy and Astrophysics* 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & McKinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. *Reviews of Geophysics*. 60. 10.1029/2021RG000736.
- De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, *International Journal of Climatology* 26:897—913.
- Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data* 14(4), <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>
- Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” *Geophysical Research Letters* 47(1) <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020a) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” *Nature* 29 January 2020 <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020b) RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 27791–27792 (2020)
- Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. *Nature Climate Change*. 13, 127–129 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>
- Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, *Nature*, 347, 169 – 172
- Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” *Science Advances* 7(22) May 2021
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>
- McKittrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.

- McKittrick, Ross R. (2010) Atmospheric Oscillations Do Not Explain the Temperature-Industrialization Correlation. *Statistics Politics and Policy* Vol 1. No. 1., July 2010
- McKittrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. *Climatic Change* doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5>
- McKittrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) Socioeconomic Patterns in Climate Data. *Journal of Economic and Social Measurement*, 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336
- McKittrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) “Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per-Capita Approach.” *Journal of Forecasting*, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7, 769-779
- Parker, D.E. (2006) “A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban.” *Journal of Climate* 19:2882—2895.
- Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, JayLawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* February 1999 <https://doi.org/10.1029/1998GL900322>
- Pielke Jr., Roger and Ritchie, Justin (2020) “Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment” *Social Sciences Research Network* April 2020, available at: <https://ssrn.com/abstract=3581777>
- Pielke Jr, R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. *Environmental Research Letters* 17 024027 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4ebf/pdf>
- Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from TSI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. *Remote Sensing* 11(21) 2569 <https://doi.org/10.3390/rs11212569>
- Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *Journal of Geophysical Research.*, 129.
- Schwalm, C.R., S. Glendon, P. B. Duffy (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 117, 19656–19657 (2020). Soon, W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; et al. (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. *Climate* 2023, 11, 179. <https://doi.org/10.3390/cli11090179>
- Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* April 2025 <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1>
- Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, et al. (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. *Geoinformatics and Geostatistics: An Overview* 1:2.
- Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. *Surveys in Geophysics* 35 pp. 897—912 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y>

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

Fejezet-összefoglaló

Egyre erősödik az a felismerés, miszerint a klímamodellek alkalmatlanok az emelkedő CO₂-koncentráció hatására fellépő ún. egyensúlyi klímaérzékenység (ECS) meghatározására. Az IPCC adataalapú megközelítések felé fordult, beleértve a történelmi adatokat és a paleoéghajlati rekonstrukciókat, de ezek megbízhatóságát adatokhiányok korlátozzák.

Az adataalapú klímaérzékenység (ECS) értékek általában alacsonyabbak, mint a klímamodellekből származók. Az IPCC AR6 az ECS valószínű tartományára vonatkozóan felső határként 4,0°C-ot ad meg, ami alacsonyabb, mint az AR5 4,5°C-os értéke. Úgy tűnik, hogy a felső határ csökkentését a paleoéghajlati adatok kellően alátámasztják. Az AR6 alsó határa az ECS valószínű tartományára vonatkozóan 2,5°C, ami lényegesen magasabb, mint az AR5 1,5°C-os értéke. Az alsó határ emelése kevésbé indokolt; az AR6 óta előkerült bizonyítékok szerint a *valószínű* tartomány alsó határa 1,8°C körüli értékre tehető.

4.1 Bevezetés

Az éghajlat emelkedő CO₂-koncentrációra adott válaszána nagysága az antropogén klímaváltozásról szóló tudományos vitában, így a „klímapolitikai fellépésről” szóló nyilvános vitában is központi szerepet játszik. Ennek a válasznak a legegyszerűbb mértéke a globális átlagos felszínhőmérséklet emelkedése, amelyet az Egyensúlyi Klímaérzékenység (ECS) számszerűsít. Az ECS-t a CO₂ iparosodás előtti 280 ppm-es koncentrációjához képesti megduplázódására várható felmelegedés mértékeként definiálják, miután minden klímakomponensnek volt ideje az alkalmazkodásra. Egyes összetevők, mint például az alsó légkör (troposzféra) hőmérséklete, gyorsan alkalmazkodnak, míg más összetevők alkalmazkodása, például a mélyóceáné és a krioszféraé, akár évszázadokig is eltarthat. A rövidebb időléptékeket jobban leírja egy kapcsolódó mérőszám, az Átmeneti Klímaválasz (TCR); definíció szerint ez annak a felmelegedésnek a mértéke, amikor a CO₂-koncentráció úgy megduplázódik meg, hogy 70 éven keresztül évi egy százalékos emelkedik.

Az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiája számára 1979-ben készült Charney-jelentés (National Research Council 1979) azt javasolta, hogy a legvalószínűbb ECS 3,0 ± 1,5°C legyen. Az IPCC ismételten megerősítette ezt a tartományt, csak kisebb eltérésekkel, egészen a legutóbbi, 6. számú jelentéséig. Az 5. számú jelentés 1,5–4,5 °C-ot jelölt meg valószínű tartományként (66 százalékos valószínűséggel), továbbá kijelentette: rendkívül valószínűtlen, hogy az ECS (95 százalékos valószínűséggel) 1,0 °C alatt legyen, és nagyon valószínűtlen (90 százalékos valószínűséggel), hogy meghaladja a 6,5 °C-ot.

Az ECS bizonytalansága makacsul nagy maradt, annak ellenére, hogy számos egyedi tanulmány a szűkítést állította (Hausfather 2023). Legutóbb az 6. számú jelentés a *valószínű tartományt* 2,5–4,0 °C-ra szűkítette, és a *nagyon valószínű tartományt* 2,0–5,0 °C-nak tekintette. Ez az alsó tartománybeli szűkítés vitatott, amint azt alább tárgyaljuk.

Az ECS bizonytalanságai a politikai döntéshozatal szempontjából nagy jelentőséggel bírnak. Amint azt a 11. fejezetben tárgyaljuk, a gazdasági modellek a CO₂-kibocsátás költségeinek előrejelzésére az ECS értékeit használják. A hagyományos érték (3,0 °C) a CO₂-kibocsátás tekintetében jellemzően szerény globális társadalmi költségekkel járt, ami elegendő volt bizonyos politikai intézkedések igazolására, de ezeket többnyire a század későbbi szakaszára halasztották. Ha az ECS nagyon magas (4,5 °C felett), akkor sürgetőbbé válik az azonnali agresszív kibocsátás-szabályozás, míg 2,0 °C alatti ECS esetén gazdaságilag semmilyen CO₂-kibocsátás-szabályozás nem indokolt (Dayaratna et al. 2017, 2020). Pontos becslést lehetetlen készíteni, ezért a politikai döntéshozatalnak a bizonytalanságot figyelembe kell vennie.

Önmagában a légköri CO₂ megduplázódásának egyensúlyi felmelegedési hatása valamivel több, mint 1 °C (Soden és Held 2006). Az ECS nagyobb értékei már pozitív visszacsatolásokról erednek, amelyek a CO₂ felmelegedését felerősítik. A vízgőz-visszacsatolás pozitív: melegebb légkörben több vízgőz lehet, ami önmagában is erős üvegházhatású gáz. A melegebb hőmérséklet kevesebb hó- és tengeri jégtakarót is eredményez, ami lehetővé teszi a Föld számára, hogy többet nyeljen el a napsugárzásból. Ezen visszacsatolások néhány egyszerű becslése az ECS-t körülbelül 2°C-ra növeli (Sherwood et al., 2020). Az ECS magasabb értékei pozitív felhő-visszacsatolásokkal kapcsolatosak.

Klimakutatók az egyensúlyi klímaérzékenység meghatározásához többféle bizonyítékot használnak:

- Klímamodell-szimulációk
- Történelmi megfigyelések
- Paleoklíma-rekonstrukciók
- A visszacsatolások folyamatalapú megértése

4.2 A klímaérzékenység modellalapú becslése

Az IPCC AR4-ben és AR5-ben megadott ECS-tartományokat elsősorban nagyléptékű klímamodellek, más néven általános cirkulációs modellek (GCM-ek) viselkedésének vizsgálatával kapták meg. Az IPCC azonban az AR6-ban irányt váltott, amikor egy közvetlenebb, adat alapú módszertan felé fordult. Itt a GCM-ből kiinduló klímaérzékenység-meghatározás használatának néhány buktatóját tárgyaljuk.

Az ECS klímamodell-szimulációkból a CO₂ koncentrációját megduplázásával határozható meg úgy, hogy a felmelegedés egyensúlyba kerüléséig több évszázadnyi várakozást is figyelembe vesznek. Az ilyen hosszú szimulációk szükségességének elkerülése érdekében a „tényleges klímaérzékenységet” általában a CO₂ hirtelen megnégyszereződését követő 150 éves szimulációból adják meg.

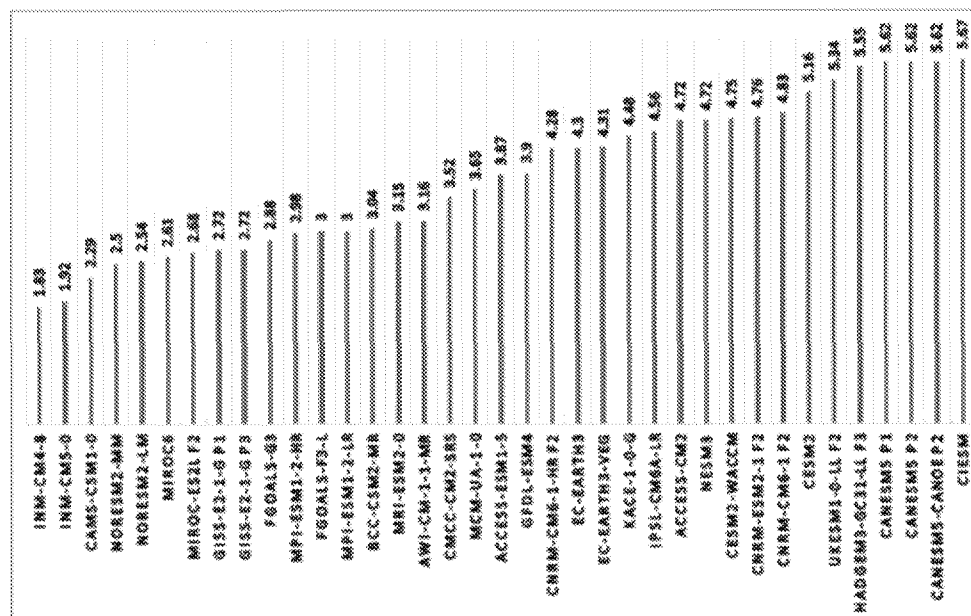
Az ECS elvileg a globális felmelegedési modellek (GCM) a rendszer egészéből levezethető (ún. emergens) tulajdonsága – vagyis nem közvetlenül paraméterezett vagy hangolt, hanem a szimuláció eredményeiben jelenik meg. Az egyébként hihető GCM-eket és paraméterválasztásokat azonban a várható felmelegedési ütemmel való észlelt konfliktus, illetve az elfogadott tartományon kívül eső modell klímaérzékenységevel szembeni idegenkedés miatt elvetették (Mauritsen et al. 2012). Ez volt a bevett gyakorlat az AR4-ben használt modellek esetében; a modellezők azonban idővel eltávolodtak ettől. Mauritsen és Roeckner (2020) azonban még egy CMIP6 modellben is a következőket állítják a Max Planck Intézet (MPI) klímamodelljükkel kapcsolatban (a kiemelés tőlünk való):

„Dokumentáltuk, miként hangoltuk az MPI-ESM1.2 globális klímamodell, hogy az megfeleljen a felmelegedés műszeres adatainak; ez a törekvés egyértelműen sikeres volt. Az események történelmi sorrendje miatt a választás az volt, hogy ezt gyakorlatilag úgy tegyük meg, hogy nem aeroszolkényszer hangolásával, hanem **felhő-visszacsatolások** segítségével körülbelül 3 K-es **ECS-t célozzunk meg.**”

Azaz az MPI modellezők kiválasztották a 3°C-os ECS-értéket, majd a felhőparaméterezéseket a kívánt eredményhez hangolták.

Amint megjegyeztük, a CO₂-megduplázásból eredő közvetlen felmelegedés csak körülbelül 1°C (Soden és Held 2006); a további felmelegedés olyan éghajlati visszacsatolásokról ered, amelyeket a GCM nem explicit módon, hanem fizikai folyamatok paraméterezésén alapulva old meg. Az ECS

magasabb értékei elsősorban pozitív felhő-visszacsatolásokból erednek, miközben a visszacsatolások nagysága és előjele is nagyon bizonytalan. A felhő-visszacsatolás elemei közé tartozik a felhők földrajzi szélességi eloszlásban megmutatkozó változások, a felhőmagasság-eloszlás változásai (alacsony és magas felhők változásai), a felhők halmazállapotának változásai (jég vs. folyadék), a felhőrétegszecske-méret változásai (az aeroszolrétegszecskek koncentrációjának és/vagy összetételének változásaival összefüggésben), a felhők csapadékhatékonyságának változásai, sőt még a felhők 24 órás napsütési ciklus szerinti eloszlásának változásai is (Curry és Webster, 1999). A GCM-ek kis léptékük miatt nehezen tudják ezeket a folyamatokat helyesen szimulálni, nemhogy megjósolni, hogyan fognak változni a jövőben. Továbbá a felhőfolyamatok modulálják a vízgőz-koncentrációt, a hőmérséklet-ingadozás mértékét és a felszín albedó-visszacsatolásait.



4.1. ábra: A CMIP6 modelleegyüttes 37 klímamodelljének egyensúlyi klímaérzékenysége °C-ban. A különféle modellek azonosítói a vízszintes tengely mentén vannak feltüntetve. Forrás: (Scafetta, 2021)

Az AR5-ben használt CMIP5 klímamodell-együttes ECS-értékei a 2,0–4,7°C közötti intervallumba esnek; e tartomány az AR6-ban használt CMIP6 modellek esetében 1,8 és 5,7°C közé nőtt (Chen et al., 2021, Scaffeta 2021, lásd 4.1. ábra). Ahelyett, hogy tisztázódna a modellalapú klímaérzékenység, a lehetséges tartomány növekedni látszik. A CMIP6-ban az ECS CMIP5-höz képest összességében felfelé történő eltolódásának fő oka a pozitív felhő-visszacsatolás erősödése, amit számos CMIP6 modellben a felhőparaméterezés változásai okoznak (Zelinka et al., 2020).

A modell finomhangolásával és a felhőparaméterezésekre való magas érzékenységgel kapcsolatos aggodalmak miatt az AR6 (2021) az éghajlati érzékenység értékelésében nem az éghajlati modell szimulációira támaszkodott, hanem adatalapú módszerekre.

4.3 A klímaérzékenység adatalapú becslése

Az éghajlati érzékenység a felszíni hőmérséklet és az óceáni hőtartalom műszeres adataiból is becsülhető, kombinálva az éghajlati kényszerek (pl. üvegházhatású gázok, napenergia, vulkánkitörések, aeroszolok) múltbeli változásainak becslésével (Otto et al., 2013). Ezen információk felhasználásával egyszerű empirikus energiamérleg-modellt lehet alkalmazni. Ez egy olyan

visszacsatolási paraméter becslését igényli, amelynek bizonytalanságai a kapott ECS-ben nagymértékben felerősödnek (Roe és Baker, 2007).

Az adatalapú módszerek pontossága a bemeneti adatok minőségétől függ. Feltételezésekre van szükség az óceánok hőtárolásával kapcsolatban, és jó adatok csak az elmúlt évtizedekre állnak rendelkezésre. A legnagyobb bizonytalanság forrása az aeroszolrészecskék mennyisége és összetétele, valamint azok kölcsönhatása a felhők sugárzási tulajdonságaival (az úgynevezett aeroszol közvetett hatása; lásd a 3.1.1., 3.1.2. ábrákat). Az éghajlati modellek az üvegházhatású gázokra válaszul felmelegedést, az aeroszolokra pedig lehűlést mutatnak (Schwartz et al., 2007). A megfigyelt 20. századi felmelegedés vagy az alacsony ECS-sel és a kismértékű aeroszol lehűléssel, vagy a magas ECS-sel és a magas aeroszol lehűléssel van kimutathatóan összhangban. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok használata mind üvegházhatású gázokat, mind aeroszolókat juttat a légkörbe, a CO₂ felmelegítő hatásának elkülönítéséhez mindkét hatást meg kell becsülni.

A paleoklíma- proxikat a Föld hőmérsékletében bekövetkezett paleoéghajlati változások és a kényszerítő tényezők változásaira vonatkozó becslések összehasonlításával a múltbeli éghajlati érzékenység megismerésére is alkalmazzák. A két leginformatívabb időszak az utolsó jégkorszaki maximum (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt), ami alatt körülbelül 3–7 °C-kal hidegebb volt, mint ma, és egy középső pliocén időszak (körülbelül hárommillió évvel ezelőtt), aminek folyamán 1–3 °C-kal melegebb volt, mint ma. A legjobb bizonyítékot arra, hogy az éghajlati érzékenység magas értékei valószínűtlenek, az utolsó jégkorszaki maximum idején tapasztalt lehűlés korlátok adják. A paleoklíma-becslés azonban a becsült hőmérsékletekben és kényszerítő tényezőkben egyaránt nagyon nagy bizonytalanságokkal jár. Továbbá a múltbeli éghajlati állapotokon alapuló éghajlati érzékenység becslése nem feltétlenül alkalmazható az éghajlati rendszer jelenlegi állapotára.

Az éghajlati szakirodalomban vissza-visszatérő téma, hogy a történelmi adatokon alapuló ECS-becslés kisebb értéket ad, mint az éghajlati modellekből következtetett ECS-becslés (Sherwood és Forest 2024). A 2012 és 2024 közötti lektorált szakirodalomban körülbelül 15, historikus adatokon alapuló becslés jelent meg, amelyek az ECS legjobb becslését 1,0 °C és 2,5 °C között adták, bár a kritikusok megkérdőjelezték néhány módszert, valamint az adatok minőségét is. Az AR6 esetében az IPCC elsődlegesen Sherwood et al. (2020) eredményein alapul, amelyek a historikus adatokat és a paleoklimatikus közelítő értékeket folyamatalapú megközelítéssel kombinálták, és legjobb becslésre 3,1 °C-ot kaptak, 2,6–3,9 °C közötti valószínű tartománnyal. Lewis (2022) számos aggályt fogalmazott meg ezzel az eredménnyel kapcsolatban, beleértve a módszertani hibákat, az elavult bemeneti értékeket és a szubjektív Bayes-előfeltevések használatát az elemzésben. Lewis elemzése megállapította, hogy az éghajlati érzékenységre sokkal alacsonyabb becsült értékek és sokkal szűkebb korlátok adódnak, mint amik kijöttek a Sherwood et al. által végzett elemzésből. A medián 2,2°C (1,8–2,7°C a 17–83 százalékos valószínűségi tartományban, és 1,6–3,2°C az 5–95 százalékos, nagyon valószínű tartományban). Az IPCC AR6 mindössze 5 százalékos valószínűséget becsült arra, hogy az ECS 2,3°C alatt lesz, míg ugyanezt Lewis 50 százalék felettire becsülte. A Sherwood et al., valamint Lewis közötti vitáról szóló legfrissebb publikációk tovább védik álláspontjukat: Sherwood és Foster (2024), valamint Lewis (2025).

Az AR6-ban hangsúlyozott érv szerint az adatalapú ECS-becslések az úgynevezett „mintázathatás” miatt alábecsülhetik az üvegházhatású gázokra adott jövőbeli felmelegedési reakciót (Forster et al., 2021). Úgy vélik, hogy a Csendes-óceán trópusi részén erősen befolyásolja a Föld ürbe történő hősugárzásának általános hatékonyságát, de egyes régiók hatékonyabban távolítják el a hőt, mint mások. Ha a trópusi Csendes-óceán nyugatról keletre irányuló hőmérsékleti gradiense egy melegebb éghajlatban gyengül, a felmelegedés ott koncentrálódik, ahol a hő kevésbé hatékonyan távolítható el, növelve az ECS-t.

A legtöbb klímamodell azt szimulálja, hogy az emelkedő koncentrációjú üvegházgázok gyengítik a nyugat-keleti hőmérsékleti gradienst, ami arra késztette az IPCC-t az AR6-ban, hogy arra a következtetésre jusson, hogy az adatalapú ECS-becslések a jövőbeni ECS-értéket alábecsülték. Seager et al. (2019) azonban rámutatott arra, hogy - a modellekkel ellentétben - a nyugat-keleti hőmérsékleti gradiens az idő múlásával erősödött. Azzal is érveltek, hogy a klímamodellekben ennek az ellenkezőjét előrejelző mechanizmus az óceáni dinamika hibás jellemzésén alapult, és nincs ok arra,

hogy a gradiens gyengüljön. Hasonló érvet fogalmazott meg nemrégiben Lee et al. (2024). E tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy „a megfigyelt trend íve az erősödő légköri ŰHG-terhelésre adott választ tükrözi”; más szóval, az ŰHG-felmelegedésnek a hőmérsékleti gradiens jövőbeni erősödéséhez, nem pedig gyengüléséhez kellene vezetnie. A légköri hűtés egyre erősebb hatékonysága azzal jár, hogy a jövőbeni ECS egy melegedő éghajlaton *alacsonyabb* lehet a jelenlegi becsléseknél.

4.4 Tranziens klímaérzékenység

Az átmeneti klímaválasz (TCR) az éghajlati érzékenységre vonatkozóan hasznosabb megfigyelési korlátot biztosít. A TCR az a globális hőmérséklet-emelkedés, amely akkor következik be, amikor a CO₂-szint 70 éven keresztül évi 1 százalékkal növekszik (azaz fokozatosan duplázódik meg). Az ECS-hez képest a megfigyeléssel meghatározott TCR-értékek elkerülik az óceáni hőfelvétel bizonytalanságainak problémáit és a hosszabb távú visszacsatolási folyamatok (pl. jégtagarók) időléptékeiből adódó egyensúlyi állapotok meghatározásának homályos határát. A TCR-t jobban korlátozza a történelmi felmelegedés, mint az ECS-t. Az AR6 a TCR nagyon valószínű tartományát 1,2–2,4 °C-nak becsülte. Az ECS-sel ellentétben a TCR felső határa szigorúbban korlátozott. Összehasonlításképpen, a Lewis (2023) által meghatározott TCR-értékek 1,25–2,0 °C között vannak, ami sokkal jobb egyezést mutat az AR6 értékekkel, mint amit az ECS-értékek összehasonlításakor láthattunk.

Hivatkozások

- Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end ‘climate sensitivity’ can now be ruled out. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out>
- Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC’s sixth assessment report on climate science. <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science>
- Chen, D., et al. (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In Thermodynamics of atmospheres and oceans (pp. 351–385). Academic Press.
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. Climate Change Economics April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. Environmental Economics and Policy Studies <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Forster, P., et al. (2021). The Earth’s energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

- Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O'Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. *Climate Dynamics*, 62(1–2), 229–246. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7>
- Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>
- Lewis, N. (2025). Comment on “Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?” by Sherwood and Forest (2024). *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179>
- Thorsten Mauritsen et al., (2012) “Tuning the Climate of a Global Model,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 4, no. 3 <https://doi.org/10.1029/2012ms000154>
- Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002037. <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6(6), 415–416. <https://doi.org/10.1038/ngeo1836>
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629–632. <https://doi.org/10.1126/science.1144735>
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. *Climate*, 9(11), 161. <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? *Nature Climate Change* 1, 23–24, <https://doi.org/10.1038/climate.2007.22>
- Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>
- Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 2679–2686. <https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024>
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>
- Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*, 19(14), 3354–3360. <https://doi.org/10.1175/jcli3799.1>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

5 ELTÉRÉS A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

Fejezet-összefoglaló

A klímamodellek elmúlt évtizedekre visszamenő alkalmazása számos vonatkozásban felmelegedési torzítást mutat. A kényszertényezők becsült változásaira túl nagy földfelszíni felmelegedés adódik (a legalacsonyabb ECS klímaértékű modellek kivételével), a modellben túl nagy a felmelegedés az alsó és a középső troposzférában, valamint felfelé túl nagy az erősítés.

A klímamodellek az amerikai kukoricaövben túl nagy közelmúltbeli sztratoszférikus lehűlést, érvénytelen félgömbi albedó értékeket, túl nagy hóveszteséget és túl nagy felmelegedést is mutatnak. Az IPCC elismerte ezen problémák némelyikét, de nem mindegyiket.

5.1 Bevezetés

Az antropogén üvegházgázok légköri szintjének emelkedésére bekövetkező jövőbeli klímaváltozások előrejelzésének elsődleges eszközei a klímamodellek. Annak felméréséhez, hogy a klímamodellek alkalmasak-e erre a célra, ésszerű feltenni azt a kérdést, hogy a modellek mennyire jól adják vissza a jelenlegi éghajlatot és annak változásait az elmúlt évszázad folyamán. Az „Éghajlatmodellezés” című keretes rész részletesen ismerteti a klímamodellek működését.

Kiemelt aggodalomra ad okot az a tény, hogy miután több évtizeden át, körülbelül három tucat modellel dolgoztak a világ kutatóközpontjai, a légköri CO₂ hipotetikus megduplázódására adott válaszként bekövetkező jövőbeli felmelegedés modellezett mértékeiben egymáshoz képest több mint háromszoros szorzótényezők is vannak, amint azt az előző fejezetben tárgyaltuk. A modellek közötti eltérések e tartománya évtizedek óta nem csökkent.

A klímamodellek nemcsak a jövővel kapcsolatos nézeteltéréseik miatt problémásak, hanem abban a tekintetben is, hogy képesek-e a közelmúltbeli eseményeket jól visszaadni. E fejezetben áttekintjük a klímamodellek pontosságának néhány legfontosabb mérőszámát: a történelmi felszíni, a troposzférabeli és a sztratoszférabeli hőmérsékleti trendek reprodukálási képességét; a vertikális felmelegedési profil reprodukálási képességét; és más éghajlati jellemzők, például a havazás reprodukálásnak képességét. Mindegyik esetre érvényes az a megállapítás, hogy a becsült múltbeli kényszertényezőkre adott válaszként a modellátlagok a túl nagy felmelegedés felé tévednek el.

TUDÁSDOBOZ: Klímamodellezés

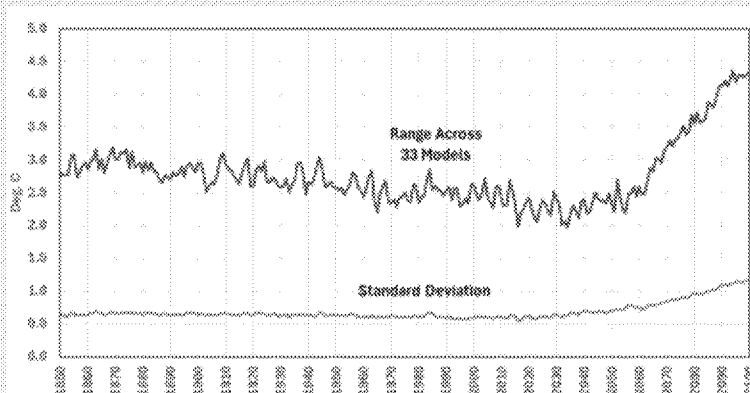
Az összes klímamodell (a legegyszerűbb kivételével) a Föld szárazföldi felszínét egy körülbelül 100 km-es négyzetrács segítségével ábrázolja. A légkör szimulálásához e négyzetek felett jellemzően 30, esetleg annál több rácsdobozt helyeznek el. Az óceánt hasonló, de finomabb ráccsal modellezzik. A légkört és az óceánokat több tízmillió rácsdobozra osztják fel.

A fizikai törvényeken alapuló számítógépes modellek kiszámítják, hogyan mozog a levegő, a víz és az energia a rácsdobozok között az idő múlásával. Az időlépés akár 10 perc is lehet, és ennek a folyamatnak több milliónyi ismétlése lehetővé teszi az éghajlat évszázadokon át tartó szimulációját. Ezeknek a modelleknek a lefuttatása még a legerősebb szuperszámítógépeken is hónapokig eltarthat. A szimulációs eredmények összehasonlítása a történelmi éghajlati adatokkal segít felmérni a modell pontosságát, míg a jövőbe mutató előrejelzéssel becslést adnak a feltételezett emberi és természeti hatásokra bekövetkező éghajlatváltozásra.

Annak ellenére, hogy egyszerűnek hangzik, az éghajlatmodellezés rendkívül összetett. Számos kritikus folyamat a rácsméretnél kisebb léptékben zajlik. Például a napfény és a hő áramlása a légkörben erősen függ a felhőzettől. Mivel az egyes felhők nyomon követése nem járható út, a kutatóknak „alrácsos” feltételezéseket kell tenniük a felhők eloszlásáról az egyes rácsdobozokban. A hó- és jégtakaró, ami azt befolyásolja, hogy mennyi napfény verődik vissza vagy nyelődik el a felszínen, egy másik alrácsos feltételezést jelent.

Minden egyes alrácsos feltételezéshez numerikus paraméterekre van szükség, amelyeket gondosan be kell állítani. A modellezők kezdetben a fizika és a megfigyelt éghajlati minták alapján becsülik meg ezeket a paramétereket, majd lefuttatják a modellt. Mivel a kezdeti eredmények gyakran jelentősen eltérnek a valós megfigyelésektől, ezeket a paramétereket „hangolják”, hogy a megfigyelt éghajlati jellemzőkhöz jobban illeszkedjenek. A különböző modellezőcsoportok eltérő feltételezéseket és hangolási stratégiákat alkalmaznak, és ez vezet eltérő eredményekre. A hangolás a klímamodellezés szükséges, de kényes oldala, mint minden összetett rendszer esetében. A rossz hangolás pontatlan szimulációkhoz vezethet, míg a túlzott hangolás azzal a kockázattal jár, hogy az eredményeket mesterségesen tereli előre meghatározott következtetések felé.

A jelenlegi éghajlat modellreprezentációinak skálája nagyon széles. Az egyik legalapvetőbb mutató – a Föld átlagos felszíni hőmérséklete – körülbelül 3°C-kal változik a CMIP6 modellekben 1880 előtt (5.1. ábra), majd 2040-ig kissé szűkül, ezután több mint 4°C-ra divergál. Összehasonlításképpen: a 20. századi felmelegedés csak körülbelül 1,0°C volt. Ez az eltérés arra utal, hogy a modellek fizikai folyamatai között jelentős különbségek vannak.



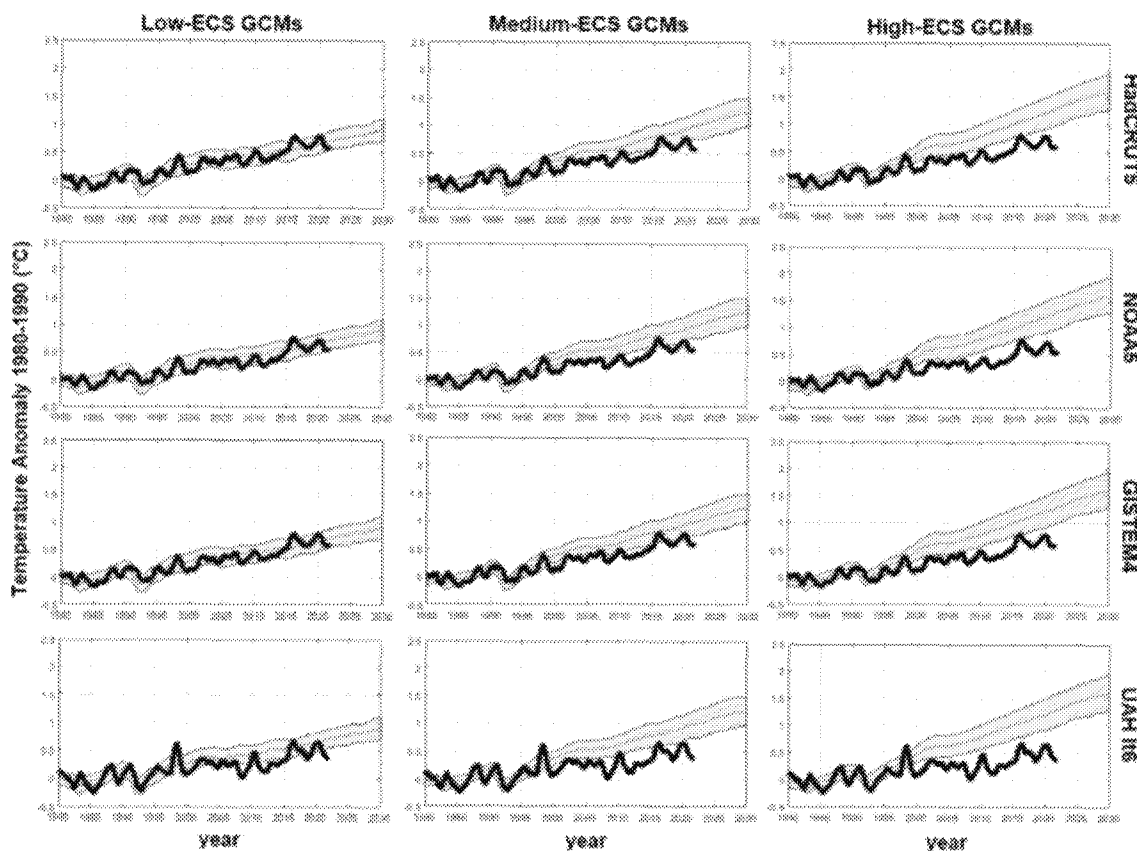
5.1. ábra: CMIP6 Átlagos felszíni hőmérséklet tartománya 33 modellben és szórás az SSP5-85 forgatókönyv alapján. Adatok a KNMI Climate Explorer weboldaláról: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>

A modellek azon képességén túl, hogy leírják a mai éghajlat jellemzőit, a társadalom számára kritikus kérdés az, hogy mennyire jól jelzik előre a nehezen megfogható emberi hatásokra (például az üvegházgáz-kibocsátásra, az aeroszol általi hűtésre és a földhasználat változásaira) adott válaszokat. A legfontosabb szempont, amelyet a modelleknek helyesen kell rögzíteniük, a „visszacsatolások”. Ezek akkor fordulnak elő, amikor az éghajlatváltozás vagy felerősíti, vagy elnyomja a további felmelegedést. Általánosságban elmondható, hogy az összes visszacsatolás modellezett nettó hatása a CO₂ közvetlen felmelegedési hatását megduplázza, sőt megháromszorozza.

5.2 Felszíni felmelegedés

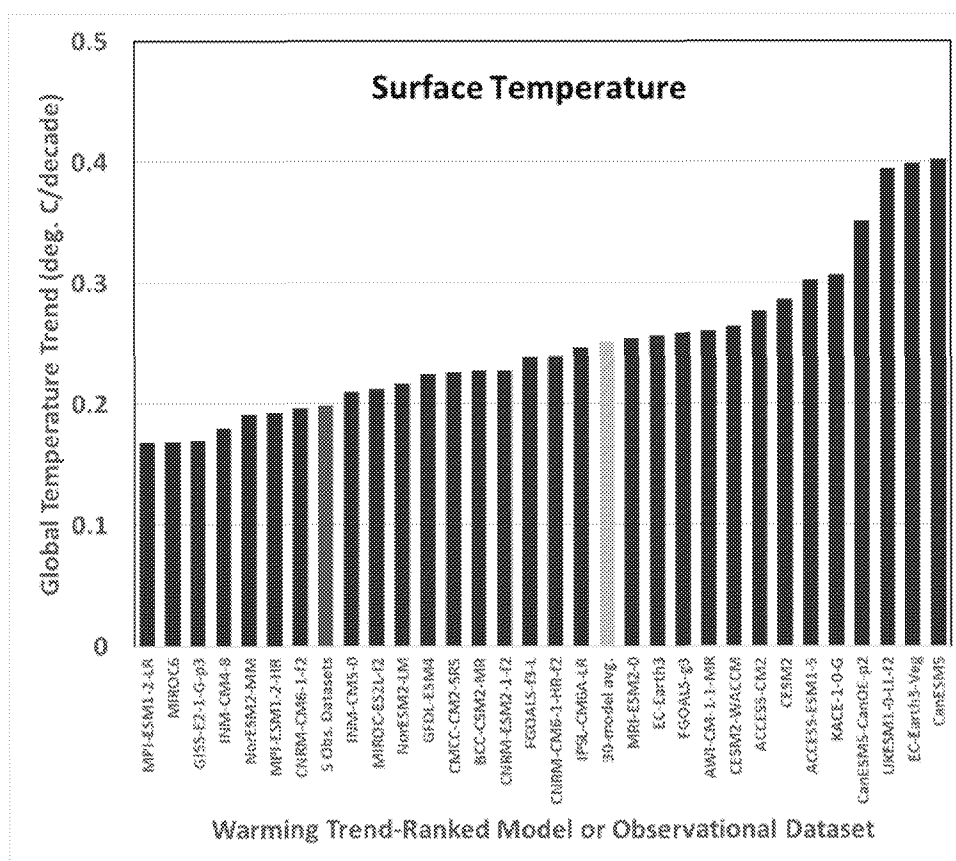
Egy klímamodell érvényességének egyszerű tesztje az, hogy képes-e reprodukálni a történelmi felmelegedést az olyan ismert múltbeli éghajlati tényezők változásaira adott válaszként, mint az üvegházgázok. Az 5.2. ábra Scaffeta (2023) munkájából származik, amely a legújabb generációs (CMIP6) klímamodelleket alacsony ECS (1,5–3,0 °C), közepes ECS (3,0–4,5 °C) és magas ECS (4,5–6,0 °C) kategóriákba csoportosítja, és összehasonlítja az 1980 utáni globális átlaghőmérsékleti szimulációs tartományait három felszíni hőmérsékleti idősor és egy műholdas alsó troposzféra hőmérsékleti adatsor tartományaival.

A bal szélső oszlop azt mutatja, hogy az alacsony ECS-modellek meglehetősen jól követik az 1980 utáni történelmi felmelegedési megfigyeléseket, a középső és a jobb oldali oszlop viszont azt mutatja, hogy a közepes és magas ECS-modellek a felmelegedést feltűnően túlbecsülik.



5.2. ábra: Modelleredmények összehasonlítása a Föld felszíni felmelegedésére vonatkozó megfigyelésekkel. Az oszlopok alacsony ECS-t (13 modell), közepes ECS-t (11 modell) és magas ECS-t (14 modell) mutató modellcsoportoknak felelnek meg, míg a sorok széles körben használt megfigyelt hőmérsékleti idősorokat mutatnak. Az első három felszíni átlagokat, a negyedik pedig az alsó troposzféra átlagát mutatja. Minden panelen a sárga szín jelöli az adott csoportra vonatkozó klímamodell-szimulációk átlagát és tartományát ($\pm$ egy szórás). A vastag fekete vonal a jelzett rekordban megfigyelt éves átlaghőmérsékletet ábrázolja. Forrás: Scaffeta (2023) 2. ábra.

Spencer (2024) ugyancsak hasznos összefoglalást adott a modellek és a megfigyelések közötti eltérésekről: összehasonlította a felszínhőmérsékleti adatsor trendjét az egyes klímamodellekben szereplő trenddel, amint azt az 5.3. ábra foglalja össze; a legtöbb klímamodell az 1979 óta végzett megfigyeléseknél lényegesen nagyobb felmelegedést mutat.



5.3. ábra: Globális felszíni levegőhőmérsékleti trendek (°C/évtized), 1979-2024, különböző CMIP6 klímamodellekből (piros; 30 modell átlaga: narancssárga); valamint késsel jelölt három hőmérsékleti adatsor (HadCRUT5, NOAA Global Temp és Berkeley 1 deg.) és két újrafeldolgozási adatsor (ERA5 és NCEP/NCAR R1) átlaga. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>.

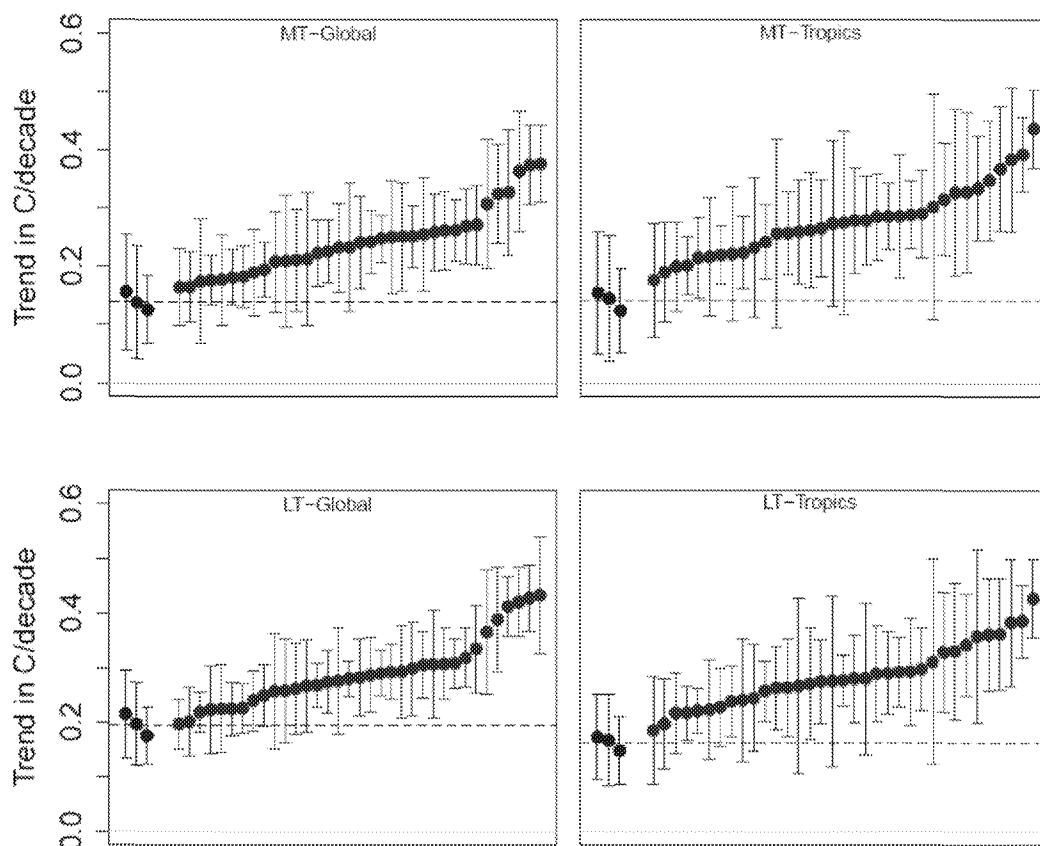
5.3 Troposzférai melegedés

Régóta ismert, hogy az éghajlati modellek átlaga túlbecsüli a trópusi troposzférában bekövetkező felmelegedést. E régió fontos tesztje az éghajlati modelleknek, mivel itt jelenik meg először és a legerősebben az antropogén üvegházhatású felmelegedés jele. A troposféra-trendekben mutató torzítások a hőátadási folyamatokban meglévő olyan modellhibákat jeleznek, amelyek a felszíni felmelegedési torzításokra is átragadnak.

Az eltérést az első amerikai klímaváltozási tudományos programjelentésben (Karl et al. 2006) súlyos következtetésként jelölték meg, és azóta minden IPCC-jelentésben megemlítték, de az eltérés az idő múlásával egyre súlyosbodott, és az eltérés ma már globális. McKittrick és Christy (2020) összehasonlították a CMIP6 klímamodellekben megfigyelt troposféra-felmelegedési trendeket a műholdakról, meteorológiai légkömből és újrafeldolgozási rendszerekből megfigyelt trendekkel. Az 1979-2014 közötti átlagos megfigyelt felmelegedési trendet mindegyik modell túlbecsülte mind az alsó, mind a középső troposféra rétegeiben, mind globálisan, mind a trópusokon. A legtöbb egyedi modellben az eltérés statisztikailag szignifikáns volt, és a modellek átlagában is nagyon szignifikáns.

Az 5.4. ábra a 2024-ig frissített adatokkal való összehasonlítást mutatja be (McKittrick és Christy 2025). Az utóbbi meleg évek kissé felfelé mozdították a megfigyelt trendet, és kiszélesítették a trend konfidencia intervallumait, de az általános minta ugyanaz marad: a modell túl nagy felmelegedés felé tér el, a legtöbb esetben a különbség statisztikailag szignifikáns, és az átlagos eltérés statisztikailag nagyon szignifikáns. McKittrick és Christy (2020) azt is kimutatták, hogy az eltérés

nagyobb a magas ECS-értékű modellekben, de még az alacsonyabb átlagos ECS-értékű modellek is túl nagy felmelegedést jósolnak. Ha a jövőbeli klímamodellek realisztikusan ábrázolnák a globális troposzféra- felmelegedést, valószínűleg kevésbé lennének érzékenyek, mint a CMIP6 modellegyüttes alacsony ECS-értékű tagjai.



5.4. ábra: A megfigyelt és a CMIP6 modellezett felmelegedési trendek ($^{\circ}\text{C}/\text{évtized}$, 1979–2024) a globális és trópusi alsó (LT) és középső troposzférában (MT), McKittrick és Christy (2020) módszertanát alkalmazva, 2014 és 2024 közötti adatokkal frissítve. Kék pontok: felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 3 adattermék (rádiószondák, újraelemzés és műholdak) esetében. Kék szaggatott vonal: a felmelegedési trend átlaga 3 megfigyelt sorozat esetében. Piros pontok: modellezett felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 35 modellben, a legalacsonyabbtól a legmagasabbig rendezve.

Amint azt korábban említettük, az IPCC régóta elismeri a modellek és a megfigyelések közötti eltérést. Például az AR6 443–444. oldala a trópusi troposzféráról ezt állítja (a globális összehasonlítással nem foglalkozik):

Az AR5 óta számos tanulmány továbbra is ellentmondást mutatott ki a szimulált és a megfigyelt hőmérsékleti trendek között a trópusi troposzférában, a modellek nagyobb mértékű felmelegedést szimuláltak, mint megfigyelések (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; McKittrick és Christy, 2018; Po-Chedley et al., 2021)... Az 1979–2014 közötti időszakban a modellek jobban összhangban vannak az alsó troposzférában végzett megfigyelésekkel, és a legkevésbé a felső troposzférában, 200 hPa körül, ahol az eltérések meghaladják az évtizedenkénti $0,1^{\circ}\text{C}$ -ot. Számos, CMIP6 modelleket használó tanulmány arra utal, hogy az éghajlati érzékenységbeli különbségek fontos tényezők lehetnek a szimulált és a megfigyelt troposzférikus hőmérsékleti trendek közötti eltérésben (McKittrick és Christy, 2020; Po-Chedley et al., 2021), bár nehéz dekonvolúciózni az éghajlati érzékenység, az aeroszolkényszer változásainak és a belső

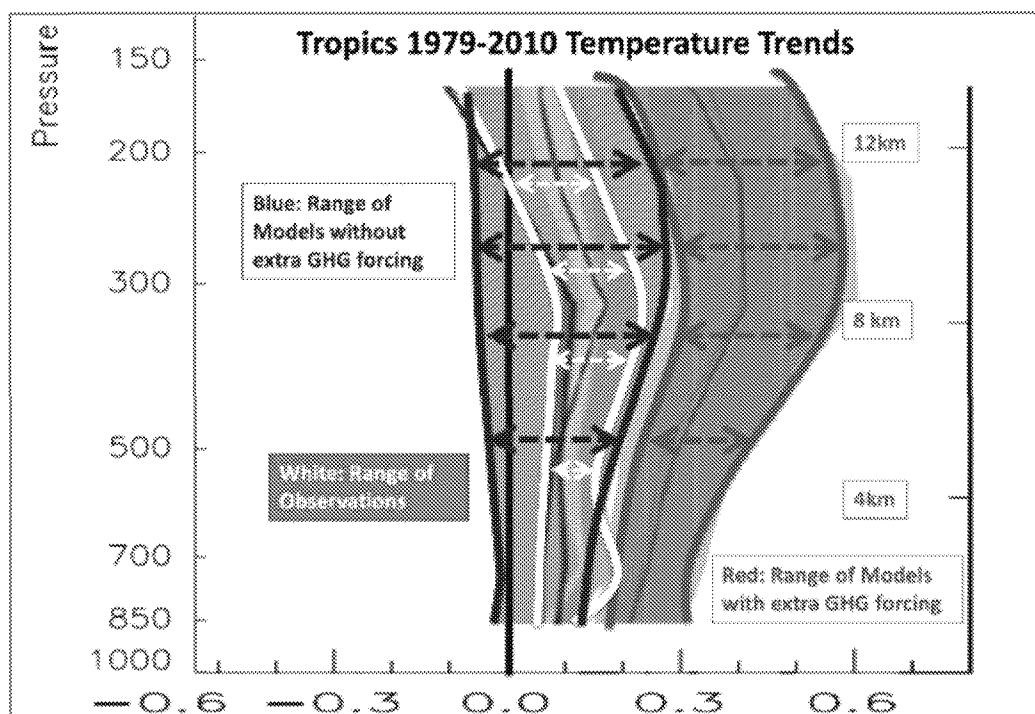
változékonyságnak a troposzférikus felmelegedési eltérésekhez való hozzájárulását (Po-Chedley et al., 2021). Egy másik tanulmány megállapította, hogy egy feltételezett negatív trópusi felhő-visszacsatolás hiánya az egyik modellben a felső troposzféra felmelegedési eltéréseinek felét magyarázhatja (Mauritsen és Stevens, 2015).

... Összefoglalva, a tanulmányok továbbra is úgy találják, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellszimulációk erősebben melegszenek, mint ahogy azt a trópusi közép- és felső troposzférában az 1979–2014 közötti időszakban végzett megfigyelések mutatják (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; Suárez-Gutiérrez et al., 2017; McKittrick és Christy, 2018), és hogy részben a túlbecsült felszíni felmelegedés felelős (Mitchell et al., 2013; Po-Chedley et al., 2021). Ezért *közepes megbízhatósággal* értékeljük úgy, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellek a felső trópusi troposzférában megfigyelt felmelegedést az 1979–2014 közötti időszakban továbbra is legalább 0,1°C-kal túlbecsülik.

Figyelemre méltó, hogy a túlzott modellfelmelegedésre utaló bizonyítékok felhalmozódása ellenére az IPCC a felmelegedési torzítás létezését csak *közepes megbízhatóságúnak* tekinti.

5.4 Eltérések a függőleges hőmérsékleti profil mentén

Egy másik fontos eltérés jelent a modellek és a megfigyelések között a klímamodellekben található magassággal való túlzott erősítés. Az összehasonlítás az AR5 10. fejezetében szerepelt, bár csak az online kiegészítésben (10.SM.1. ábra), és csak egy olyan ábrán, amelynek formázása elfedte a lényegét. A 10.SM.1. ábrára sem a fő IPCC-jelentésben, sem az összefoglalóban nem hivatkoznak, így az olvasók nem vehették észre. Bár első pillantásra nem nyilvánvaló, azt mutatja, hogy az alsó troposzférában az 1979-2010 közötti felmelegedés olyan kicsi, hogy összhangban van azzal, hogy nincs üvegházgáz-kényszer, és nem egyezik azokkal a modellfuttatásokkal, amelyek üvegházgáz-kényszert feltételeznek. Az 5.6. ábrán átdolgoztuk az IPCC AR5 10.SM.1. ábráját, hogy kiemeljük ezt a kritikus pontot.

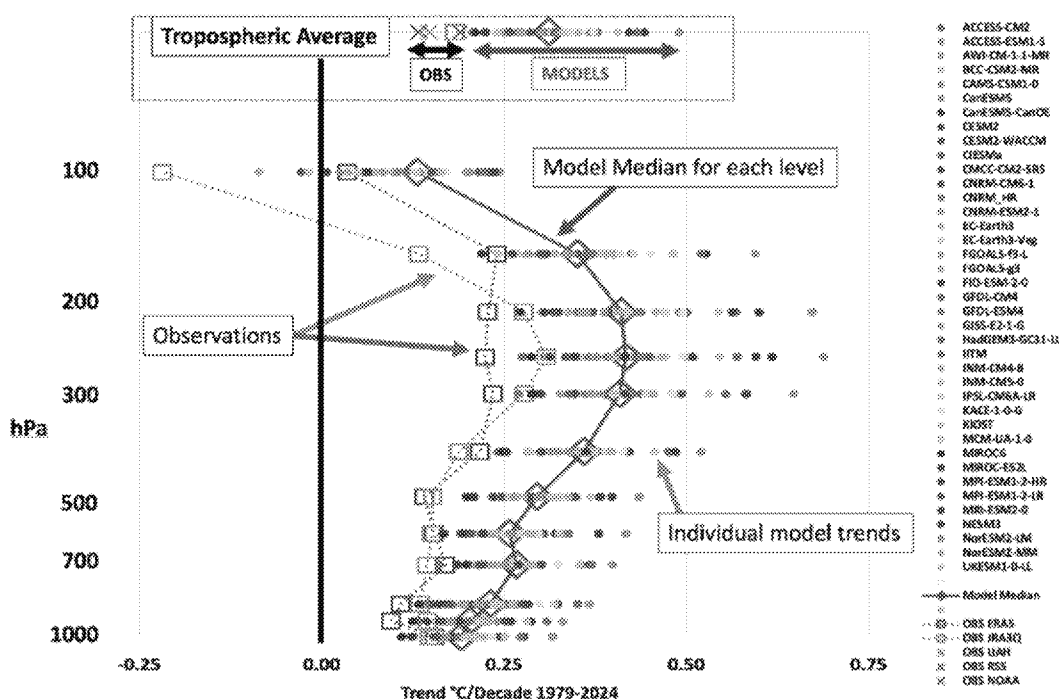


5.5. ábra: Függőleges melegedési mintázat a trópuson (a déli szélesség 20° és az északi szélesség 20° között). Vízszintes tengely: °C/évtized. Forrás: Az IPCC AR5 annotált verziójának 10.SM.1 ábrája

Az 5.5. ábra összehasonlítja a modell és a megfigyelés hőmérsékleti trendjeit a déli földrajzi szélesség 20° és az északi szélesség 20° között (a trópusi övezetben), a magasság függvényében. Ebben a régióban, ahol a modellek szerint a felmelegedésnek a legerősebbnek kellene lennie, a megfigyelések (itt fehér színnel jelölve) a kék „Nincs CO₂” sávon belül, és teljes mértékben a „CO₂-vel” piros burkológörbén kívül esnek. Ez azt jelenti, hogy a teljes trópusi légköri oszlopban, a felszíntől a sztratoszféra aljáig, a megfigyelt felmelegedési trendek olyan kicsik, hogy összhangban vannak az antropogén CO₂-t nem tartalmazó modellek kimenetével, és kívül esnek a megnövekedett CO₂-tartalommal kényszerített modellek által generált felmelegedési trendek teljes burkológörbéjén.

Hasonló összehasonlítást végzett Christy és McNider (2017), aminek frissített változatát (1979-2024) az 5.6. ábra mutatja be. A modellezett hőmérsékleti trendek meghaladják a felszíntől a troposzféra tetejéig tartó megfigyeléseket, a megfigyelt trendek a legtöbb nyomásszinten a teljes modelltartomány alatt vannak. Az 5.6. ábrán látható a három műholdas adatkészlet (NOAA, UAH és RSS) trópusi troposzférikus hőmérsékleti (TTT) átlaga is, összehasonlítva az 1979-2024 közötti éghajlati modellek ugyanazon rétegének átlagával. A megfigyelt trendek ismét teljesen a modelltartomány alatt helyezkednek el.

A modellezők által a modellekben zajló fizikai folyamatok jellemzésére hozott döntések széles skáláját (lásd a fenti 5.1. szakaszban a Klímamodellezés című keretes írást) a középső troposzférában megfigyelhető trendek nagy szórása mutatja, ami medián ± 40 százaléka (5.6. ábra). Ez élesen illusztrálja a bizonytalanságokat a turbulenciát, a nedvességel kapcsolatos termodinamikát és az energiafluxusokat magában foglaló komplex rendszer modellezésére (paraméterezésére) tett kísérletekben a trópusi légkör idő- és térléptékeinek teljes tartományában.



5.6. ábra: Modellezett és megfigyelt melegedés trópusi troposzférában. Forrás: a 2024-es adatokkal is frissített Christy és McNider (2017). Zöld és kék vonalak: újrafeldolgozott megfigyelési idősorok.

Ez az eltérés sok vitát váltott ki, egyesek azzal érvelnek, hogy még ha a trópusokon nagyon kevés felmelegedést is figyelnek meg a magasban, akkor is létezik egy „forró pont” abban az értelemben, hogy a magasban a felmelegedés nagyobb, mint a felszínen (Santer et al. 2008). De erős bizonyítékok léteznek arra, hogy a modellek az erősítési rátát is eltúlozzák. Klotzbach et al. (2009) kimutatták, hogy a modellek nagyobb erősítést vetítenek előre a magasság függvényében, mint amennyit megfigyelnek. Ezt az eredményt később részletes idősoros elemzéssel (Vogelsang és Nawaz 2016) is megerősítették: kimutatták, hogy a modell és a megfigyelések közötti különbség statisztikailag szignifikáns.

A légkör hőmérsékleti profilja esetében a modellek nemcsak bizonytalanok, hanem a megfigyelésekhez képest közös felmelegedési torzítást is mutatnak. Ez bizonyos alapvető visszacsatolási folyamatokat téves felfogására utal.

Az IPCC AR6 ezt a kérdést nem vizsgálta.

5.5 Sztratoszférikus hűlés

Az antropogén klímaváltozás várható általános „ujjlenyomatának” fontos eleme a troposzféra felmelegedésének és a sztratoszféra lehűlésének egyidejű folyamata. Ez utóbbi jellemzőt az ózonréteg csökkenése és helyreállása is befolyásolja. Az AR6 elismerte, hogy lehűlést csak 2000-ig figyeltek meg. Azóta a sztratoszféra némi felmelegedést mutat, ellentétben a modell-előrejelzésekkel.

Az AR6 WG1 2. fejezet 327-9. oldala kimondja:

A teljes alsó sztratoszférában (körülbelül 10–25 km) az átlaghőmérséklet 1980 és 2019 között az összes adatot illetően csökkent, a csökkenés nagy része 2000 előtt történt. A csökkenés akkor is fennáll, ha eltávolítjuk az El Chichon (1982) és a Pinatubo (1991) vulkánkitörések trendre gyakorolt hatását, amelyről Steiner et al. (2020a) megállapították, hogy az 1979–2018 közötti lehűlési trendet évtizedenként 0,06°C-kal növelte. A 2000–2019 közötti időszakban a legtöbb

adathalmaz nem mutat jelentős trendet, még csak csak marginálisan jelentős trendet sem. Philipona et al. (2018) eredményei pedig gyenge növekedést mutatnak a 2000–2015 közötti időszakban a rádiószondákkal mintavételezett legalsó sztratoszférában....

Gyakorlatilag biztos, hogy az alsó sztratoszféra a 20. század közepe óta lehűlt. A legtöbb adathalmaz azonban azt mutatja, hogy az alsó sztratoszféra hőmérséklete az 1990-es évek közepe óta stabilizálódott, és az elmúlt 20 évben nem történt jelentős változás. Valószínű, hogy a középső és felső sztratoszféra hőmérséklete 1980 óta csökkent, de a nagyságrendet illetően alacsony a megbízhatóság.

A hivatkozott forrás, Philipona et al. (2018) a „Rádiószondák azt mutatják, hogy évtizedekig tartó lehűlés után az alsó sztratoszféra most melegszik” című cikkében kijelentette:

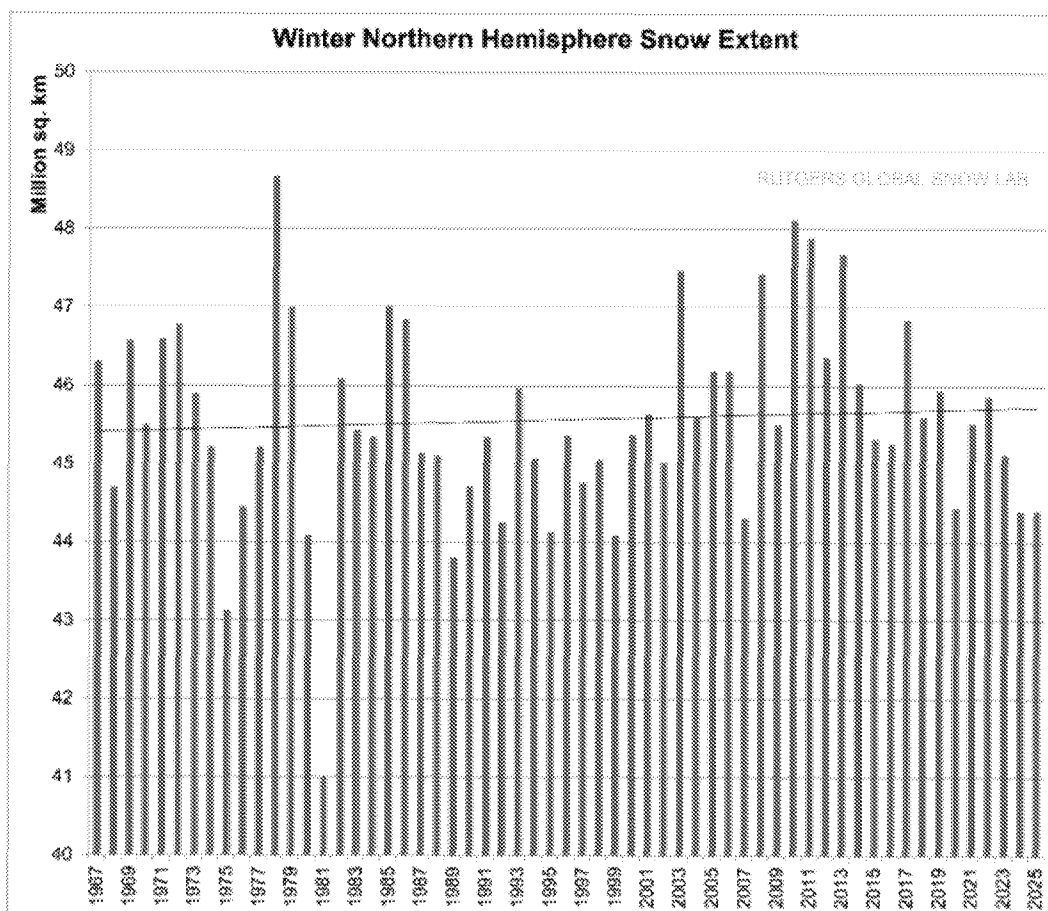
Az üvegházgázok folyamatos növekedésére és a sztratoszféra ózonrétegének elvékonyodására válaszul a klímamodellek az elkövetkező évtizedekben a troposzféra folyamatos felmelegedését és a sztratoszféra lehűlését vetítik előre. Az alsó sztratoszféra hőmérsékletének globális átlagos műholdas megfigyelése a századforduló óta nem mutat jelentős trendet. Ezzel szemben 60 állomás vertikálisan felbontott rádiószondás méréseinek elemzése az alsó sztratoszféra hőmérsékletének emelkedését mutatja a századforduló óta 15 és 30 km közötti magasságban és a legtöbb kontinensen. A trendbecslés némileg érzékeny a homogenitásértékelési döntésekre, de az alsó sztratoszférában az összes vizsgált rádiószondás adatkészlet a 20. század végi lehűlésről a 21. század eleji felmelegedésre való változást sugallja.

Santer et al. (2023) frissített adatokat is felhasznál annak kimutatására, hogy az alsó sztratoszférában a lehűlési trend nem jelent meg újra.

A troposzférikus felmelegedés és a sztratoszférikus lehűlés kombinációja az antropogén klímaváltozás gyakran emlegetett „ujjlenyomata”. A sztratoszféra-felmelegedés 2000 óta egybeesik a folyamatos felszíni és troposzférikus felmelegedéssel, efféle mintázat a klímamodell-szimulációkban nincs, és nyilvánvalóan nem egyeztethető össze az antropogén ujjlenyomattal.

5.6 Eltérések a hótakaróban

A Rutgers Egyetem Hólaboratóriuma által összeállított adatok szerint az északi félteke téli hótakarója nem csökken (5.7. ábra); sőt, inkább emelkedő tendenciát mutat.



5.7. ábra: Az északi félteke téli hótakarójának kiterjedése. Forrás: https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 (hozzáférés: 2025. május 27.)

A modellek mégis az északi félteke hótakarójának csökkenését vetítik előre egy melegedő éghajlaton, ahogyan azt Connolly et al. (2019) is leírták.

A klímamodellek rosszul magyarázták a megfigyelt trendeket [az északi félteke hótakarójában]. Míg a modellek azt sugallják, hogy a hótakarónak mind a négy évszakban folyamatosan kellett volna csökkennie, csak a tavasz és a nyár mutatott hosszú távú csökkenést, és a megfigyelt csökkenések mintázata ezekben az évszakokban meglehetősen eltért a modellezett előrejelzésektől. Ezenkívül az őszi és téli megfigyelési trendek hosszú távú növekedésre utalnak, bár e trendek statisztikailag nem szignifikánsak.

Az AR6 nagyrészt a tavaszi szezonra korlátozza az északi félteke hótakarójának kiterjedésével (SCE) kapcsolatos tárgyalását, amelyre vonatkozóan a modellek és a megfigyelések csökkenő tendenciát mutatnak. A téli változásokról a következő megjegyzést teszi (AR6 WGI 2. fejezet, 344. o.):

Az északi féltekén (az NH-ban) 1978 óta tapasztalható SCE-trend értékelése azt mutatja, hogy az októbertől februárig tartó időszakban jelentős bizonytalanság van a trendben, ahol az előjel a megfigyelési szorzattól függ. A NOAA Éghajlati Adatrekordját használó elemzés az októbertől februárig tartó SCE növekedését mutatja (Hernández-Henríquez et

al., 2015; Kunkel et al., 2016), míg a műholdakon elhelyezett optikai érzékelőkön (Hori et al., 2017) vagy a több megfigyelésen alapuló termékeken (Mudryk et al., 2020) alapuló elemzések negatív tendenciát mutatnak minden évszakban.

Az AR6 WGI 9. fejezete (1284. o.) arra mutat rá, hogy a NOAA klímaadat-nyilvántartása, amely az őszi és téli SCE növekedését mutatja, ellentmond a szárazföldi megfigyeléseknek és a modellalapú adatkészleteknek. Megjegyzi, hogy az optikai műholdképek használata a téli SCE megállapítására kihívást jelent a felhőzet és a téli hónapokban csökkenő napsugárzás miatt. A csendes-óceáni part menti államokra (CA, OR és WA) összpontosítva a hideg évszakban a tavasszal és nyáron elolvadó hegyi havazás a meleg évszak vízkészletének jelentős részét biztosítja. A fő forrásrégiók (Kaskádok és Sierra Nevada hegység) havazásának átfogó rekonstrukciója az éves összesítésekben a 19. század vége óta nem mutat jelentős tendenciákat (Christy 2022).

Összefoglalva, a naprakész Rutgers SCE adatbázis eltérést mutat a modellek és a megfigyelések között. További munkára van szükség a megfigyelési adatkészletekben lévő ellentmondásos trendek összeegyeztetésére.

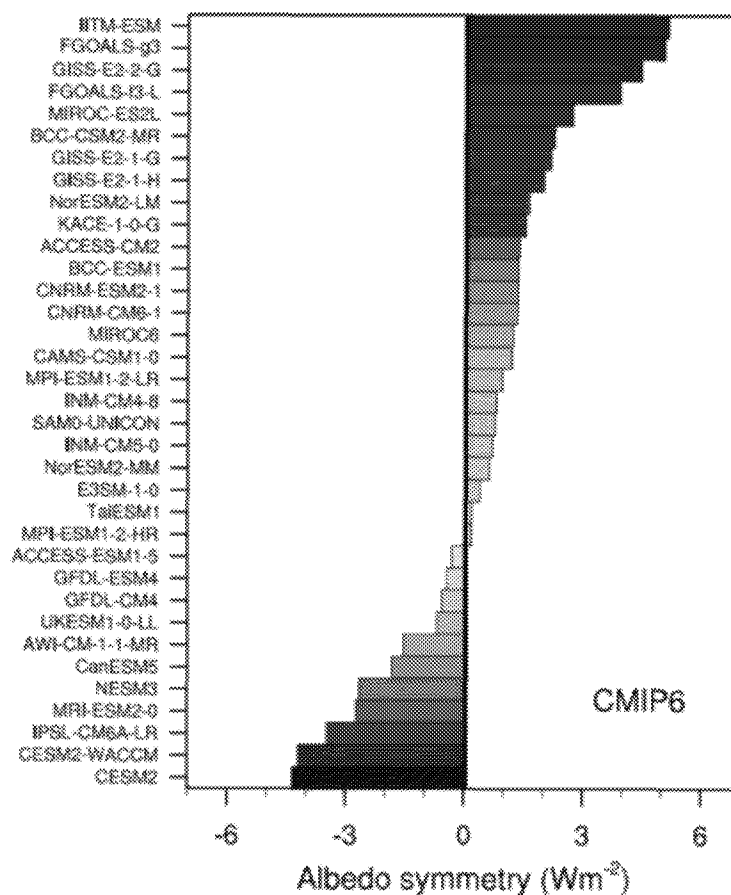
5.7 A planetáris albedó félgömbi szimmetriája

A bolygóalbedó a bejövő napsugárzásnak a Föld által az űrbe visszavert hányada. Fontos eleme a sugárzási energiaegyensúlynak, és befolyásolja, hogy a bolygó idővel felmelegszik-e vagy lehül. A bolygóalbedót jellemzően 0,30 körüli értékre becsülik; a 0,01-es léptékű változások napenergia-kényszerben körülbelül 3 W/m^2 -es változásnak felelnek meg, ami nagyobb, mint a jelenlegi antropogén kényszer. Régóta megfigyelték, hogy a modellek egymásnak és a globális bolygóalbedó értékével kapcsolatos megfigyeléseknek is ellentmondanak (Stephens et al. 2015).

A földi albedó érdekes tulajdonsága, hogy az északi félteke (NH) és a déli félteke (SH) közel azonos átlagos albedóval rendelkezik, legalábbis az ötven éve folyó műholdmegfigyelés szerint (Stephens et al., 2015). E szimmetria meglepő, mert az SH-n sokkal több óceán van, mint szárazföld. Mivel az óceán kevésbé fényvisszaverő, mint a szárazföld, az NH-nak nagyobb értékű albedóval kellene rendelkeznie. A felhőzet (ami erősen fényvisszaverő) gyakoribb az északi féltekén, és a két félteke felszíni albedóegyensúlyának eltérései a felhőzet által kompenzálódnak. Datseris és Stephens (2021) kimutatták, hogy a felhőkompenzáció a déli félteke trópusvidéken kívüli viharpályáiból származik, amelyek felhősebbek, mint az északi féltekén. Bár ennek a féltekei szimmetriának a mechanizmusa nem tisztázott, valószínűleg nagy időbeli és térbeli léptékekben működik.

Az albedó féltekei szimmetriája az éghajlati modellekhez egy egyszerű bruttó mérőszámot szolgáltat. Rugenstein és Hakuba (2023) ezt a mérőszámot az északi és a déli félteke éves átlagos albedói közötti különbségként definiálták, a visszavert napfény Wm^{-2} -ben kifejezve, és odaszerkeszthették a CMIP6 éghajlati modellekhez, ahogy az az 5.8. ábrán látható. A legtöbb CMIP6 modell nem adja vissza a megfigyelt kis aszimmetriát (kb. $0,1 \text{ Wm}^{-2}$), sőt abban sem értenek egyet, hogy melyik félteke veri vissza jobban a fényt. Ráadásul az aszimmetria nagysága egyes modellekben akár 5 Wm^{-2} -t is elérhet, ami a jelenlegi antropogén kényszernek kétszerese (körülbelül $2,7 \text{ Wm}^{-2}$).

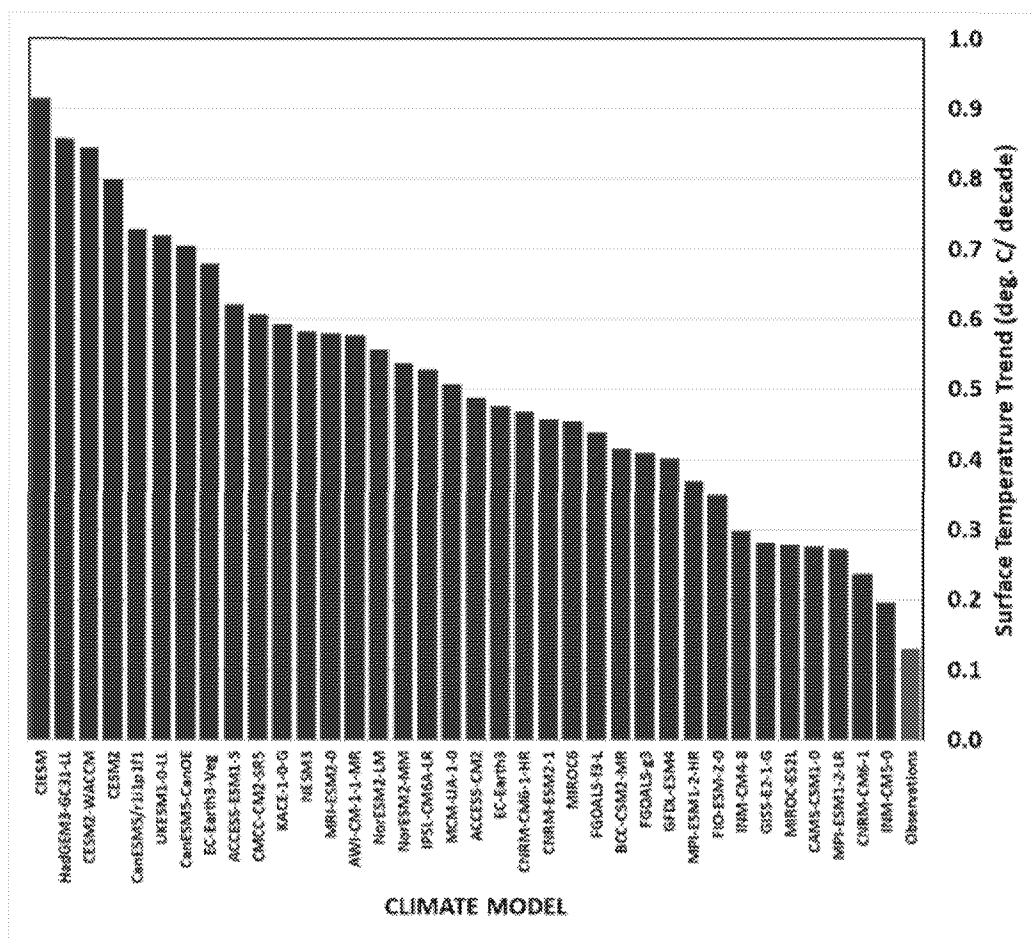
A nem fizikai albedóaszimmetriák jelentősége az éghajlati modellekben még nem teljesen ismert. Más modellvizsgálatok azonban arra utalnak, hogy az albedó féltekei közötti változásai megváltoztathatják a pólusok felé irányuló hőáramokat, a meridionális hőmérsékleti gradienseket, a viharosságot és a féltekei óceánok hőtárolási különbségeit. A modellek és a megfigyelések közötti eltérés további vfel kérdéseket vet fel a felhő-visszacsatolási folyamatokkal kapcsolatban, és így még általánosabb érvénytel csökkenti a jövőbeli éghajlat modell-előrejelzéseinek megbízhatóságát.



5.8. ábra: A 20 éves átlagos fényvisszaverőképesség (albedó) különbségei az északi és a déli félteke között a legutóbbi IPCC-értékelésben használt CMIP6 modellek esetében (színes oszlopok). A nagyon kis megfigyelt különbséget a függőleges fekete vonal jelzi. Rugenstein és Hakuba (2023) nyomán.

5.8 Az USA kukoricaövezete

A modellek és a megfigyelések közötti egyik legnagyobb eltérés az USA kukoricaövezetében található, ami a globális élelmiszertermelés szempontjából különösen fontos régiónak számít. Az 5.9. ábra a nyári (június, július, augusztus) felmelegedési trendeket mutatja a 12 államból álló kukoricaövezetben (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) 1973 és 2022 között. A megfigyelésekhez (kék) képest mind a 36 klímamodell (piros) túl gyors melegedést mutat.



5.9. ábra: Modellezett és megfigyelt felmelegedési trendek az USA kukoricaövezetében, 1973 és 2022 között.

Amint azt a 9. fejezetben tárgyaltuk, az emelkedő hőmérsékletnek az USA kukorica hozamára gyakorolt várható negatív hatásai mindmáig nem valósultak meg, ellentétben azokkal a széles körben nyilvánosságra hozott tanulmányokkal, amelyek azt állítják, hogy az elméleti jövőbeli hatások máris térkékelhetők (pl. Seager et al., 2018).

Az IPCC elismeri a regionális klímamodell-eredmények pontossági korlátait. Ez a példa azt mutatja, hogy a felhasználóknak a modell-előrejelzéseket esetleg kell gondosan értékelniük, mivel a helyi torzítások elég nagyok lehetnek ahhoz, hogy a modellek egyszerűen nem felelnek meg a célnak. Ahogy azt a modellező közösség két vezetője nemrégiben megjegyezte (kiemelés tőlem)

... úgy véljük, hogy számos olyan kulcsfontosságú alkalmazás esetében, amely regionális klímamodell-kimenetet igényel, vagy a kis léptékű folyamatokból adódó nagyléptékű változások megítélésében **a modellek jelenlegi generációja e célnak nem felel meg.** (Palmer és Stevens 2019)

Összefoglalva:

- A klímamodellek az elmúlt néhány évtized számos reprodukálási vonatkozásában felmelegedési torzításokat mutatnak.

- Túl nagy felmelegedést mutatnak a felszínen (kivéve a legalacsonyabb ECS-értékű modelleket), túl nagy felmelegedést az alsó és középső troposzférában, valamint túl nagy felerősödést a magasban
- Túl nagy sztratoszférikus lehűlést, túl sok hőveszteséget és túl nagy felmelegedést mutatnak az Egyesült Államok kukoricaövezetében.
- Az egyes klímamodellek féltekei albedókülönbsége a megfigyelésekhez képest az előjelet és a nagyságrendet illetően is széles skálán mozog. A W/m^2 -ben kifejezett tartomány háromszor nagyobb a CO_2 által jelentett közvetlen antropogén kényszernek.
- Az IPCC elismert néhány efféle problémát, de nem mindegyiket.

Hivatkozások

- Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate sensitivity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53, 511-518.
<https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z>
- Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. *Journal of Hydrometeorology* 23, 1845-1860.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1>
- Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, et al. (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations. *Geosciences* 9, 135.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9030135>
- Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. *AGU Advances* 2, e2021AV000440.
<https://doi.org/10.1029/2021AV000440>
- Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf
- Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 114(D21).
<https://doi.org/10.1029/2009JD011841>
- McKittrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. *Earth and Space Science* 7. <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24390–24395.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, et al. (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 123.
<https://doi.org/10.1029/2018JD028901>
- Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 50, e2022GL101802.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

- Santer B D, P.W. Thorne, L Haimberger et al. (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere *International Journal of Climatology* 28 1703–22 <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756>
- Santer, B.D. S. Po-Chedley, L. Zhao, C et al. (2023) Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 120 (20) e2300758120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120>
- Scaffeta, N (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics* 60, 3091–3120 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Seager, R., J. Feldman, N. Lis, et al. (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America’s arid–humid divide. Part II: The meridian moves east. *Earth Interactions* 22. <https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1>
- Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. *Environment Backgrounder*, The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models>
- Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster et al. (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
- Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: *Journal of Time Series Analysis* 38. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12209>

6 SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

Fejezet-összefoglaló

A rendelkezésre álló történelmi adatokhoz képest a szélsőséges időjárási legtöbb megnyilvánulása nem mutat statisztikailag szignifikáns, hosszú távú tendenciát. Bár az 1950-es évek óta az Egyesült Államokban több lett a forró napok száma (amint azt az AR6 hangsúlyozza), e szám az 1920-as és 1930-as évekre jellemzőkhöz képest még mindig alacsony. A konvektív (függőleges légáramlással járó) szélsőséges viharok, hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok jelentős természetes változékonyságot mutatnak, de hosszú távú növekedés az észlelések szerint nincsen. Egyes régiókban rövid időközönként kimutatható a szélsőséges csapadékesemények számának növekedése, de tartós és regionális trend nem alakul ki. A tűzvészek nem gyakoribbak az Egyesült Államokban, mint az 1980-as években voltak. A leégett terület nagysága az 1960-as évektől a 2000-es évek elejéig nőtt, azonban a becsült természetes alapszinthez képest még mindig kicsiny. Az Egyesült Államokbeli tűzvész-tevékenység erősen függ az erdőgazdálkodás gyakorlatától.

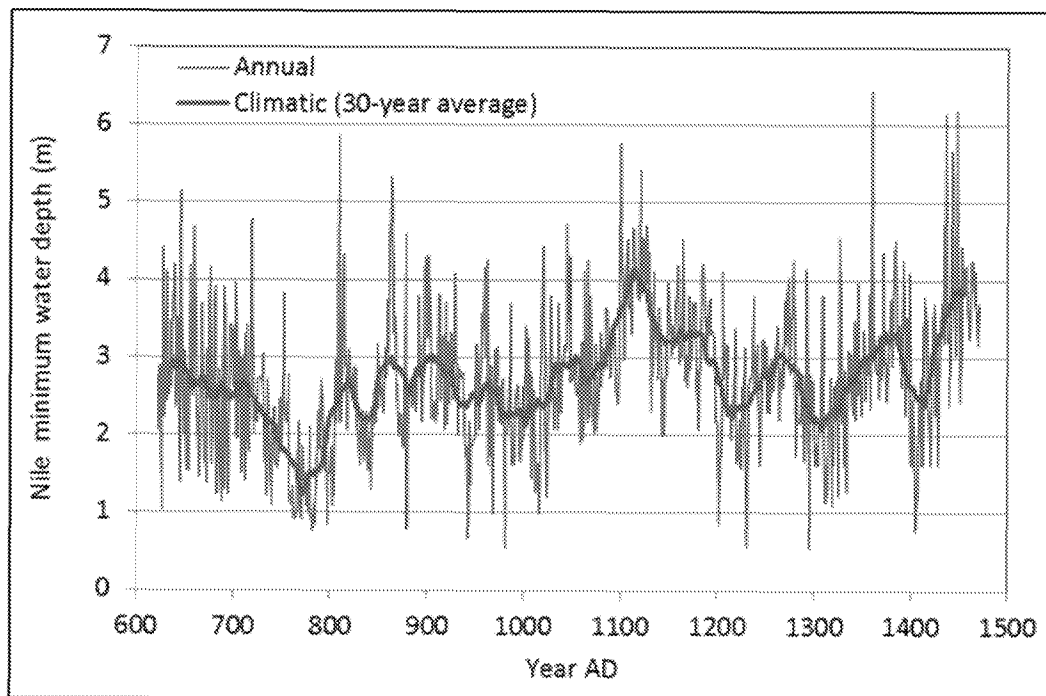
6.1 Bevezetés

A nagy hatású időjárási szélsőségek, amelyek általában a hőmérséklettel, a csapadékkal és/vagy az erős széllel kapcsolatosak, megzavarhatják az infrastruktúrát, és ezáltal veszélyeztethetik az emberi egészséget és a jólétet. A kérdés nem az, hogy bekövetkeznek-e szélsőségek. Inkább az, hogy vannak-e a szélsőségek gyakoriságában vagy jellegében hosszú távú (évtizedes léptékű) változások („észlelés”), valamint az, hogy milyen mértékben okozza ezeket a változásokat és a veszélyekben bekövetkező változásokat az antropogén üvegházgáz-kibocsátás („attribúció”; pl. AR6 Seneviratne et al. 2021).

Annak az állítására, hogy a felmelegedés súlyosbítja a szélsőséges időjárási eseményeket, az ún. folyamat alapú megértésre és egyszerű termodinamikai érvekre hivatkoztak. Naivitás azonban azt feltételezni, hogy a közelmúltbeli szélsőséges események bármelyikét az éghajlatra gyakorolt emberi hatás okozta volna. Az éghajlat az időjárás évtizedek alatti statisztikai tulajdonságairól szól, nem pedig egyszeri eseményekről. Továbbá statisztikai elemzésre csak körülbelül 130 évnyi megbízható megfigyelési adat áll rendelkezésre. Ez a rövid időszak még nem tartalmazza az összes szélsőséges eseményt, amelyet az éghajlati rendszer önmagában képes létrehozni. A geológiai idők során az éghajlati rendszer (lényegében) végtelen sokféle időjárási mintázatot és szélsőséget generált, és mivel ezekről nem történt ember általi megfigyelés, így hiányoznak az extrém statisztikák meghatározásához használt adatbázisokból [lásd alább: *A rövid adatrekordok veszélyei*]. Emiatt egy eddig példa nélküli szélsőséges esemény hozzárendelése feltételezéseket igényel a természetes változások nagyságrendjére vonatkozólag.

Ez a fejezet az extrém időjárás trendjeinek észlelésével foglalkozik, míg a 8. fejezet az ok-okozati hozzárendelést vizsgálja, a 8.4. szakasz pedig kifejezetten a szélsőséges időjárással foglalkozik. Ha nem észlelünk trendet, akkor egyértelműen nincs alapja a hozzárendelésnek. De még ha meg is figyelhető egy trend, nem feltétlenül következik, hogy azt az ember által okozott felmelegedésnek tulajdonítható.

Különösen igaz ez a csapadékeseményekre. A hidrológiai szakirodalomban régóta tudott, hogy a csapadékadatokban hosszú ideig tartó, lassú és szabálytalan oszcillációk vannak jelen (Hurst 1951, Cohn és Lins 2005, Markonis és Koutsoyiannis 2016). A változékonyság pontos becsléséhez az efféle természetes mintázati jellemzőik hosszú megfigyelést igényelnek. A természetes változékonyság időmértékéhez képest rövid feljegyzések elemzése hajlamosá tesz a trendek félreértelmezésére, túlbecsülve a ma megmutatkozó trendek jelentőségét és alábecsülve a szélsőséges események valószínűségét (Cohn és Lins 2005)



6.1.1. ábra: A Nílus folyó éves minimummélysége Kairó közelében több mint 650 éven keresztül, Kr. u. 622-től 1284-ig. A méterben mért adatok a hosszabb távú trendek körüli évenkénti ingadozások jellegzetes mintázatát mutatják. Koutsoyiannis (2013) adatai

Jó példa erre a Nílus folyó éves minimummagasságának nyolc évszázados feljegyzése, amelyet Kairó Roda-szigetén figyeltek meg, és amely a 6.1.1. ábrán látható. A Nílus folyót egy 4 millió négyzetmérföldes vízgyűjtő medencében hulló csapadék táplálja, ami a CONUS körülbelül egyharmadának felel meg. Mivel az emberi hatás a globális éghajlatra jóval a 20. század előtt biztosan elhanyagolható volt, a harmincéves átlag évszázados léptékű változékonysága teljesen természetes eredetű; a hetedik és nyolcadik századi egyiptomiak tévesen feltételezték volna, hogy az akkoriban súlyosbodó aszály lenne az „új normális”.

Ezeket a fenntartásokat szem előtt tartva vizsgáljuk meg a kiválasztott időjárási és éghajlati szélsőségek változására vonatkozó bizonyítékokat. Visszatérő téma a közvélemény és a tudományos bizonyítékok közötti széles szakadék. A médiatudósításokban, a kormányzati és a magánszektorbeli tárgyalásokon, sőt egyes tudományos szakirodalomban is rutinná váltak az általánosító kijelentések, miszerint mindenféle szélsőséges időjárás az üvegházhatású gázok és a „klímaváltozás” miatt súlyosbodik. A szakértői értékelések azonban jellemzően nem vonnak le ilyen átfogó következtetéseket, ehelyett a konkrét trendek beazonosításában, valamint az antropogén kényszerrel való ok-okozati összefüggés megállapításában rejlő nehézségeket hangsúlyozzák.

A következő fejezetekben részleteket közlünk különféle IPCC és NCA értékelő jelentésekből, a forrásokat a következőképpen jelölve:

SREX: Az IPCC különjelentése a szélsőséges események és katasztrófák kockázatkezeléséről az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás előmozdítása érdekében (2012)

AR6: Az IPCC hatodik értékelő jelentése, 1. munkacsoport (2021).

NCA4: Az Egyesült Államok klímatudományi különjelentése a negyedik nemzeti éghajlati értékelésről (2017), I. kötet.

NCA5: Ötödik nemzeti éghajlati értékelés (2023).

A részletekben a dőlt betűs rész az eredetiből való, a félkövér kiemelés tőlünk származik. Ezenkívül, ahol lehetséges, a 2024-ig terjedő időszakra vonatkozó információk megadásához standard kormányzati forrásokat használunk.

6.2 Hurrikánok és trópusi ciklonok

Az AR6 a következő értékelést nyújtja a trópusi ciklonokról (TC; itt a hurrikánok szinonimájaként használjuk):

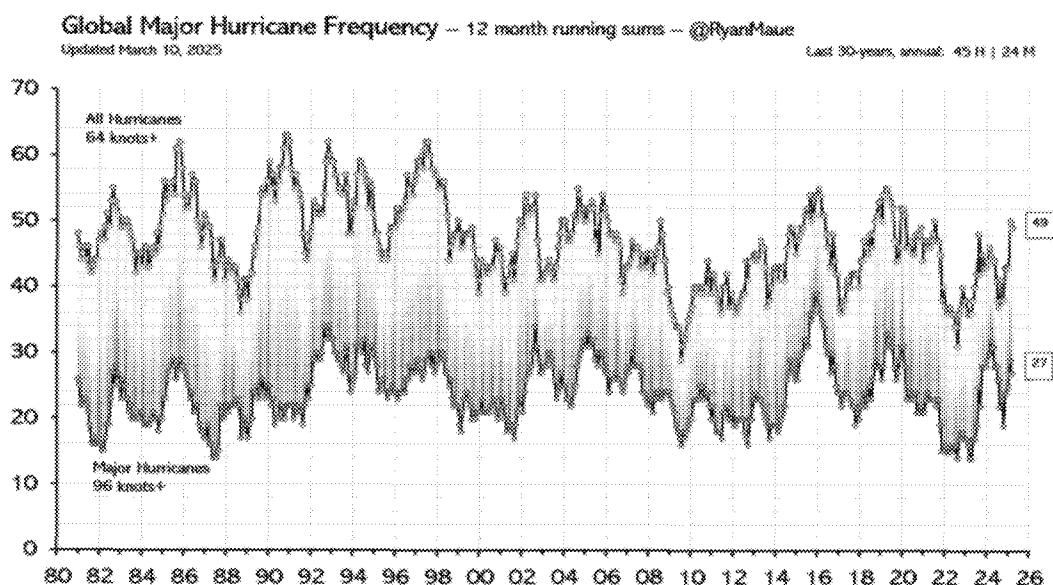
AR6: A legtöbb jelentett hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trend TC gyakoriságát vagy intenzitásalapú mérőszámát illetően *alacsony megbízhatóságú*, ugyanis a legjobb nyomon követési adatok gyűjtésére használt technológia megváltozott. (IPCC, 2021. 1585. o.)

AR6: *Valószínű*, hogy a nagyobb (3–5. kategóriájú) trópusi ciklonok előfordulásának globális aránya az elmúlt négy évtizedben nőtt... *Alacsony a megbízhatósága* a hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trendeknek az összes kategóriájú trópusi ciklonok gyakoriságát illetően (IPCC, 2023. SPM. 9. o.)

AR6: A legjobb nyomon követési adatok egy részhalmaza, amely az Egyesült Államokat 1900 óta közvetlenül érintő hurrikánoknak felel meg, megbízhatónak tekinthető, és **az amerikai partot elérő események gyakoriságában nem mutatkozik trend.** (IPCC 2021, 1585. o.)

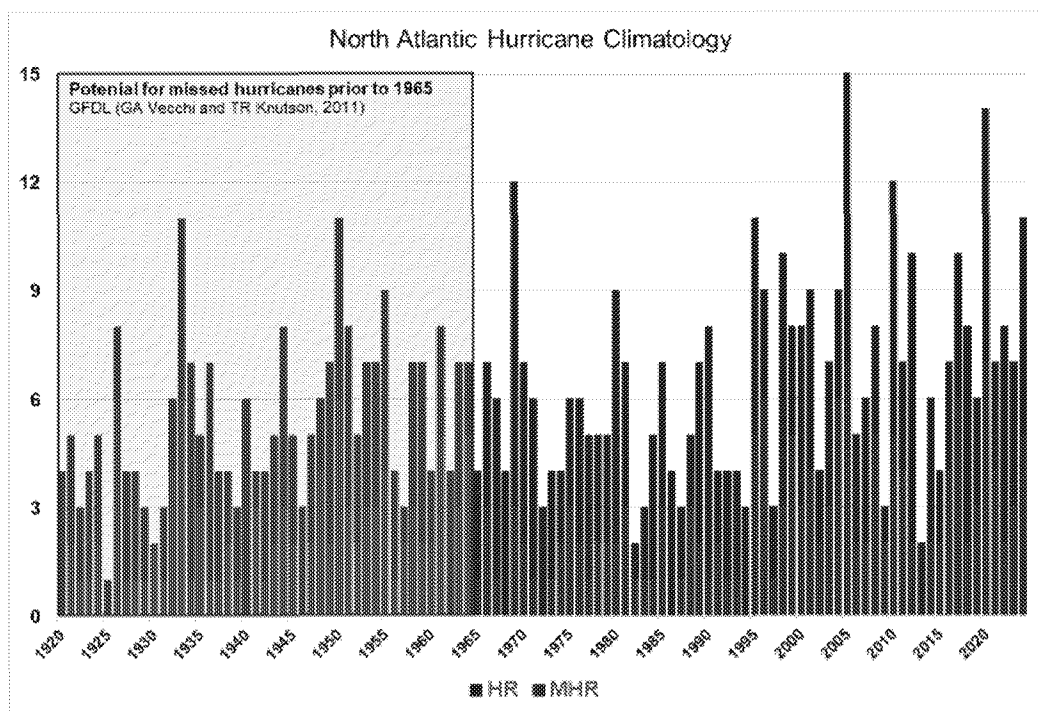
1980 óta, amióta a műholdas megfigyelések teljes mértékben lefedik a globális óceánokat, bizalommal elfogadhatjuk a globális hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) teljes számaravonatra vonatkozó adatokat. A 6.2.1. ábra azt mutatja, hogy átlagosan évente körülbelül 50 hurrikán fordul elő, amelyek közül körülbelül 25 éri el a nagyobb hurrikán státuszt (Maue, 2025). Jelentős éves és évtizedes változékonyság figyelhető meg, a hurrikánok számában enyhe csökkenés, a nagyobb hurrikánok számában pedig enyhe, de jelentéktelen növekedés tapasztalható. Ez a két trend együttesen összességében a nagyobb hurrikánok arányának növekedését eredményezi.

A globális hurrikánstatisztikát a Csendes-óceán északnyugati része uralja, amely a teljes globális hurrikánszám ~35 százalékát teszi ki, míg az Atlanti-óceán a globális hurrikánok ~15 százalékát adja (Colorado Állami Egyetem, 2025). Az Atlanti-medencére vonatkozó adatok messzebbre nyúlnak vissza, mint a többi óceánmedencére vonatkozó adatok, és az amerikai politikai döntéshozók számára ezek a legrelevánsabbak.



6.2.1. ábra: A hurrikánok és a nagyobb hurrikánok globális gyakorisága 1980 óta. Forrás: Frissítve Maue 2011 alapján.

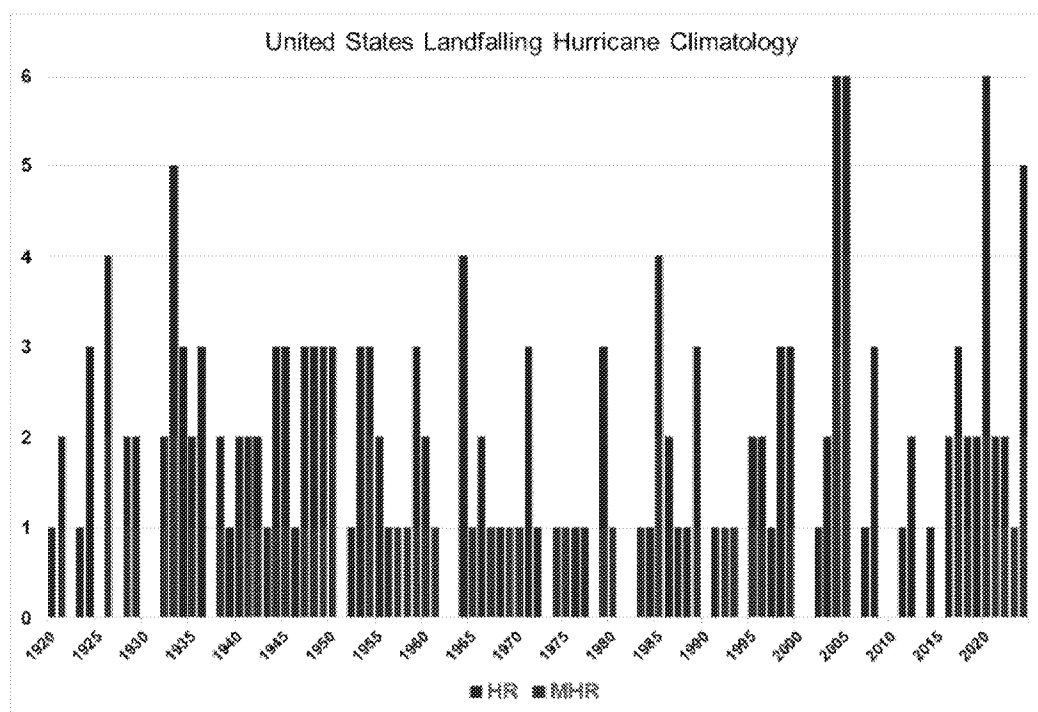
A 6.2.2. ábra az atlanti hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) gyakoriságát mutatja 1920-ig visszamenőleg. Az 1965 előtti adatok (a műholdas megfigyelések kezdete az Atlanti-óceánon, kékkel árnyékolva) némi alulszámolásról tanúskodnak, az 1920 előtti adatok pedig jelentős alulszámolást mutatnak (Vecchi és Knutson, 2011). Az atlanti hurrikánaktivitás minden mérése 1970 óta. jelentős növekedést mutat Az 1971 és 1994 közötti időszakban azonban kivételesen alacsony aktivitás volt megfigyelhető, míg magas aktivitás (az elmúlt két évtizedhez képest, még alulszámolással is) megfigyelhető volt az 1950-es és 1960-as években, sőt az 1930-as években is.



6.2.2. ábra: Hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) atlanti gyakorisága 1920 óta. Forrás: National Hurricane Center (2024)

A 6.2.2. ábra azt mutatja, hogy az atlanti hurrikánok évtizedes és több évtizedes időléptékekben erősen változnak. E változások elsősorban az Atlanti Többévtizedes Oszcillációhoz (AMO) kapcsolódnak, amely a medence egészére kiterjedő tengerfelszín-hőmérséklet és tengerszint nyomásingadozásokban nyilvánul meg, amelyek nagyléptékű óceáni cirkulációs mintázatokhoz kapcsolódnak. Az AMO 1926-1970 között és 1995-től mostanáig meleg fázisú, de 1971-1994 között hűvös fázisú volt. Ez van a legnagyobb hatással van a nagyobb hurrikánok (3+ kategória) számára, amelyeket Goldenberg et al. (2001) a normálisnál nagyobb SST-kkel és a csökkent függőleges nyírással társítottak az AMO meleg fázisában (lásd még: Bell és Chelliah, 2006; Klotzbach et al., 2018).

Klotzbach et al. (2018) átfogó értékelést végzett az Egyesült Államok kontinentális részén 1900 óta partot ért hurrikánok adatairól. A 6.2.3. ábra 2024-ig frissíti elemzésüket. Míg a partra jutó hurrikánok legnagyobb száma 2004-ből, 2005-ből és 2020-ból származik, 1920 óta nincs statisztikailag szignifikáns tendencia. A 6.2.3. ábra a nagyobb hurrikánok partrasérésének idősorait is mutatja (3-5. kategória). A feljegyzések szerint a legintenzívebb év 2005 volt (4 nagyobb hurrikán jutott partra). 2005 után azonban 2016-ig nem volt nagyobb hurrikán az Egyesült Államokban, ami a leghosszabb ilyen időszak 1920 óta.



6.2.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) partrajutási gyakorisága 1920 óta. Forrás: NOAA HRD(a) (2024)

A 6.2.3. ábra az Egyesült Államokbeli partrajutási aktivitás jelentős évközi és több évtizedes változékonyságát mutatja. Klotzbach et al. (2018) megvizsgálta, hogyan változnak a partrajutások számai az ENSO (El Niño vs. La Niña) és az Atlanti-óceáni Többévtizedes Oszcilláció (AMO) meleg és hideg fázisai szerint.

Villarini et al. (2012) az Egyesült Államokbeli hurrikánok partrajutásának elemzését nyújtja 1878-ig visszamenőleg. Bár lehetséges, hogy a 19. század végén néhány partrajutás kimaradt a Mexikói-öböl partvidékének ritkán lakott területei miatt, figyelemre méltó, hogy a teljes feljegyzésben a legintenzívebb év 1886, 7 hurrikán partra jutásával, amkor még az éghajlatra kifejtett emberi hatások sokkal kisebbek voltak, mint manapság.

A 6.2.1. táblázat a 10 legerősebb hurrikánt (és a holtversenyeket) mutatja, amelyek az Egyesült Államok partját érték. Azok közül a hurrikánok közül, amelyek tartósan 240 km/h-nál nagyobb széllel érték partot, a 21. században csak egy fordult elő.

Összefoglalva, a hurrikánaktivitás globális és regionális változékonyságának, valamint trendjeinek elemzése alapot nyújt a változások észleléséhez és okok megértéséhez. A hurrikánaktivitás viszonylag rövid történelmi feljegyzése, és a még rövidebb műholdas korszakból származó feljegyzés nem elegendő annak megállapításához, hogy a közelmúltbeli hurrikánaktivitás szokatlan-e a háttér természetes változékonyságához képest. Az atlanti hurrikánfolyamatokat jelentősen befolyásolják az Atlanti-óceán óceáni cirkulációjának természetes módozatai, nevezetesen az Atlanti-óceán Többévtizedes oszcillációja (AMO). Bár régóta feltételezik, hogy a globális tengerfelszín-hőmérséklet emelkedése a hurrikánok intenzitásának növekedését okozza, a hurrikánadatokban bármilyen jelentős trend azonosítását akadályozza a rövid adathalmaz és a jelentős természetes változékonyság.

A folyamat alapú megértés azt is sugallja, hogy a hurrikánokból származó viharhullámoknak és csapadékmennyiségnek a melegebb hőmérséklettel növekednie kellene. Azonban a változó partszakaszokra érkező hurrikánok viszonylag kis száma és az egyes viharokhoz kapcsolódó összetett dinamika kizárja a változások érdemi kimutatását.

Rank	Year	Landfall Wind (MPH)	Name
1	1935	185	"Labor Day"
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	"Last Island"
5	1886	150	"Indianola"
5	1919	150	-----
5	1932	150	"Freeport"
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

6.2.1 táblázat: Az USA partjai mentén szárazföldre kijutó legerősebb hurrikánok. Forrás: (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Hőmérsékleti szélsőségek

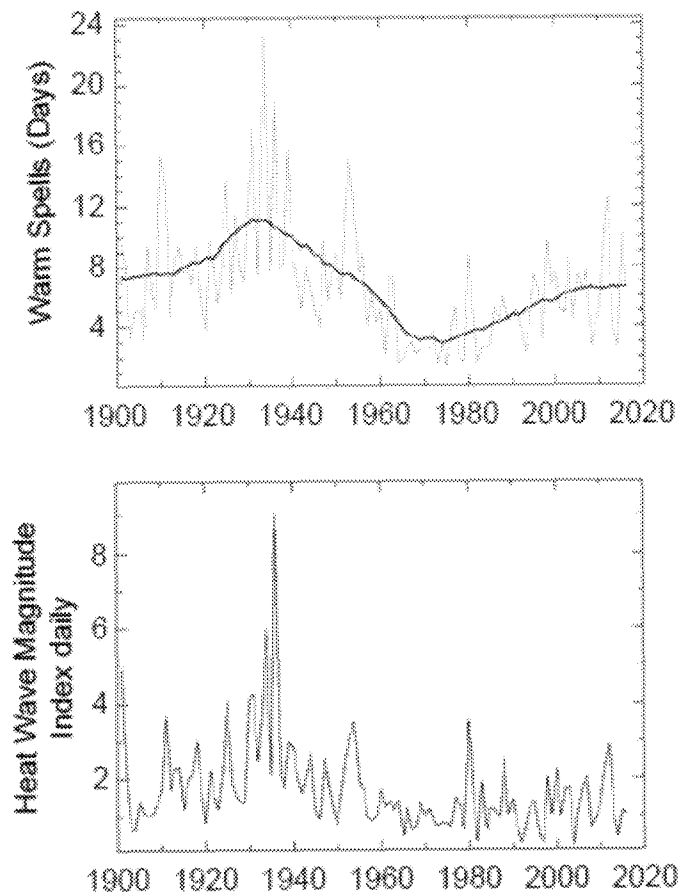
Az AR6 értékelés az 1950 utáni időszakra összpontosított, és a hóhullámok gyakoriságának és intenzitásának növekvő tendenciáiról számolt be. Az NCA4 azonban megjegyezte, hogy az Egyesült Államokban a hóhullám-aktivitás az 1930-as években érte el csúcspontját (6.3.1. ábra).

AR6: *Gyakorlatilag biztos*, hogy a meleg szélsőségek (beleértve a hóhullámokat is) az 1950-es évek óta gyakoribbak és intenzívebbek lettek a legtöbb szárazföldi régióban, míg a hideg szélsőségek (beleértve a hideghullámokat is) ritkábbak és kevésbé súlyosak lettek (SPM, A3.1)

AR6: Észak-Amerikában nagyon erős bizonyítékok vannak a meleg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának *nagyon valószínű* növekedésére, valamint a hideg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának csökkenésére az egész kontinensen, bár a trendekben jelentős térbeli és szezonális eltérések vannak. A minimumhőmérsékletek a kontinensen következetes melegedést mutatnak, míg az USA egyes részein a napi hőmérsékletek éves maximum értékében ellentétesebb trendek figyelhetők meg. (11. fejezet, 1550. o.)

NCA4: A meleg szélsőségek változásai árnyaltabbak, mint a hideg szélsőségeké. Például az elmúlt évszázadban az év legmelegebb napi hőmérséklete a Nyugat egyes részein **emelkedett**, de a Sziklás-hegységtől keletre szinte minden helyen **csökkenés volt** megfigyelhető. Valójában minden keleti régió nettó **csökkenést tapasztalt**, leginkább a Középnnyugaton (kb. 1,2°C) és a Délkeleten (körülbelül 0,8°C). (190-191. o.)

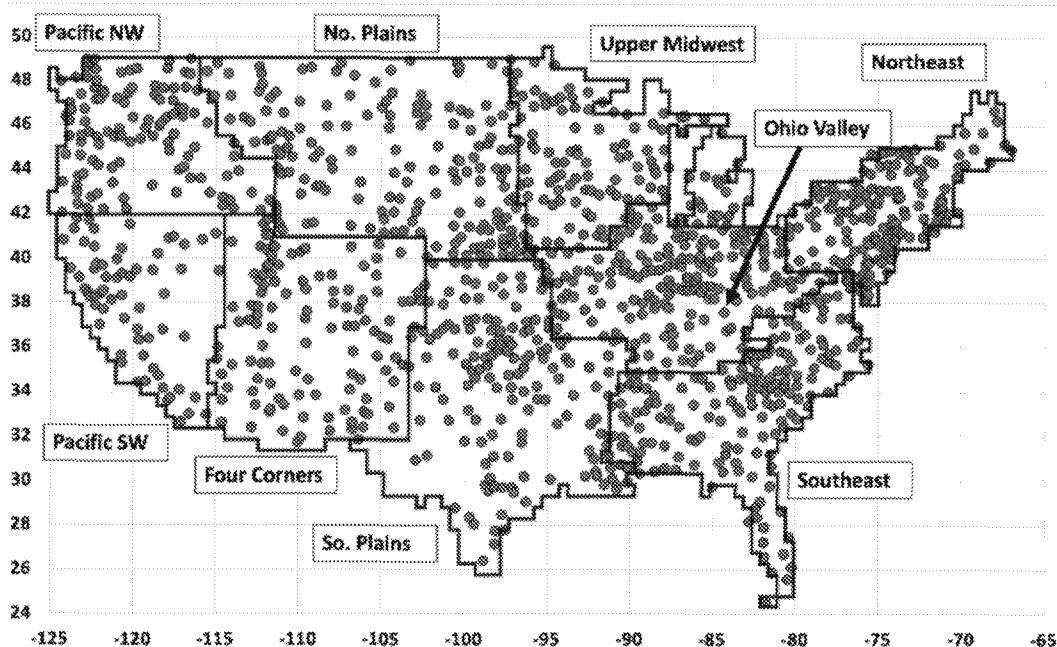
NCA4: Az 1960-as évek közepe óta az év legmelegebb napi hőmérséklete csak nagyon kis mértékben emelkedett (nagy éves eltérések közepette). A hóhullámok (6 napos időszakok, amelyekben a maximális hőmérséklet a 90. percentilis felett volt 1961–1990 között) gyakorisága az 1930-as évek közepéig nőtt, az 1960-as évek közepére jelentősen ritkábbá váltak, majd ezt követően ismét növekedett a gyakoriságuk. A meleg napi hőmérsékletekhez hasonlóan a **hóhullámok nagysága is az 1930-as években érte el a maximumát. (190-191. o.)**



6.3.1. ábra: Hőhullámok az Egyesült Államokban 1900 óta. Forrás: NCA4 6.4. ábra

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

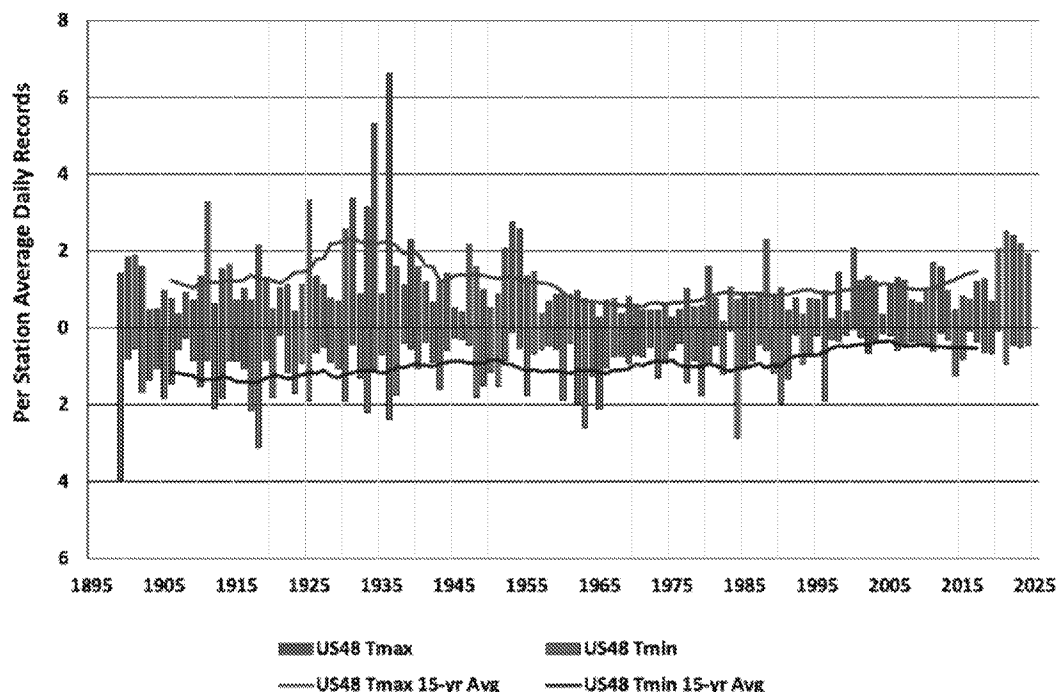
A meleg évszak napi maximumhőmérsékletei (Tmax, május-szeptember) és a hideg évszak napi minimumhőmérsékletei (Tmin, december-március) 1898 decemberétől (126 év) kezdődően állnak rendelkezésre. Az adatkészlet 1211 CONUS állomásból áll, amelyeket az Egyesült Államok Történelmi Éghajlati Hálózatának vagy USHCN állomásoknak neveztek el (lásd 6.3.2. ábra; Quinlan et al. 1987, Karl et al. 1990). Ezeket az állomásokat a NOAA választotta ki, mivel a legkevésbé problémásak az adatkimaradások, az állomásáthelyezések és a műszercserék tekintetében. Ahol még mindig hiányosságok vannak, a közeli állomásokat összevonták (a torzítást korrigálva), így az állomások esetében elérhető medián adatmennyiség 98%. Bár az adatkészletben vannak hibák, beleértve a az UHI hatások által okozott, feldolgozatlan hamis felmelegedést is, és amelyek a Tmin megfigyelését különösen torzítják, ez az adatkészlet a Tmax hőszélsőségek trendjeinek felméréséhez kellően pontos.



6.3.2. ábra: Az USHCN hőmérsékleti állomásainak helyszínei. Forrás: USHCN.

Azzal a kérdéssel kezdjük, hogy vajon változott-e a napi rekordmagas vagy alacsony hőmérsékletek előfordulása 1898 decembere óta. Minden meleg évszak 153 napból áll (május 1. és szeptember 30. között), és minden hideg évszak 122 napból (december 1. és március 31. között). Minden állomásra és napra kiszámítottuk azt az évet, amelyben a rekordmagas (legalacsonyabb) hőmérséklet előfordult. 126 évnyi megfigyelés alapján, ha nem lennének hőmérsékleti trendek az idő múlásával, a Tmax várható rekordszáma állomásonként és évente $1,21 (=153/126)$, a Tmin esetében pedig állomásonként és évente $0,96 (=122/126)$ lenne.

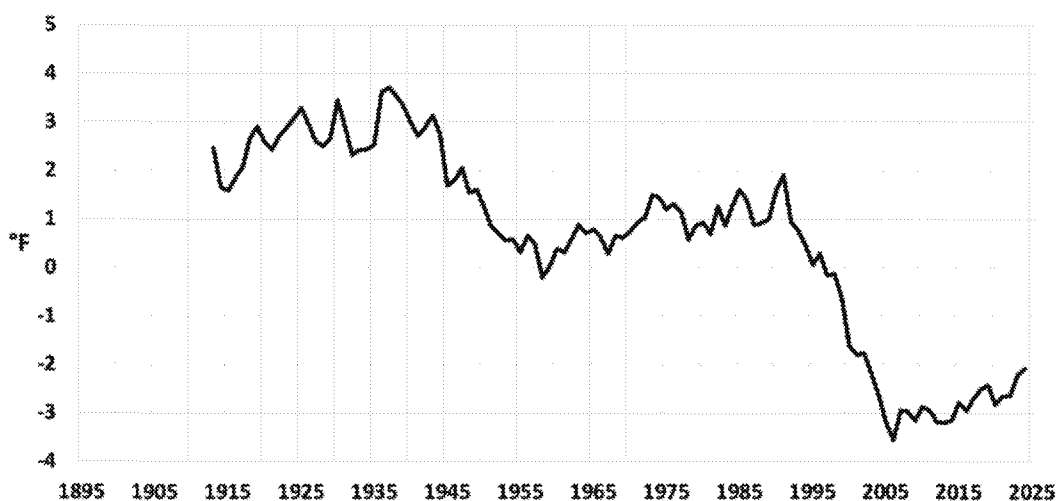
A 6.3.3. ábra ezen extrém események előfordulásának időbeli eloszlását mutatja. A CONUS meleg évszakai szélsőségeinek számos mérőszámában van egy közös vonás - az 1920-as és különösen az 1930-as évek kivételes hősége, amely 1936-ban tetőzött. Állomásonkénti átlagban a Tmax rekordok 60 százaléka és a Tmin rekordok 59 százaléka az időszak első felében (1899-1961 között) történt.



6.3.3. ábra: A napi rekordok száma a meleg és hideg évszakokban a CONUS-ban. A vonalak a 15 éves, középre igazított átlagot jelölik. Forrás: 1211 USHCN állomás, a megfigyelések legalább 92 százalékanak eléréséhez az 1898 decembere óta eltelt 126 éves időszakban szükség szerint kiegészítve. US48: összefüggő amerikai államok. Tmax: maximum hőmérséklet. Tmin: minimum hőmérséklet.

A hideg oldalon a CONUS által tapasztalt legkiterjedtebb hideg szélsőség az 1899 februárjában, Bálint-napon bekövetkezett sarkvidéki betörés volt. A második helyen az 1917-es betörés áll. A hidegrekordok gyakorisága csökkent, különösen az időszak utolsó negyedében, amikor a szélsőséges hidegeseményeknek csak 13 százalékát mérték. Ezzel szemben az utolsó negyedben a szélsőséges Tmax rekordok 25 százalékot érték el, a statisztikai várakozásoknak megfelelően. Ezeket az általános jellemzőket a korábbi értékelések is kimutatták (lásd fent, IPCC AR6, NCA4). A két előzmény kombinálásával a hideg és meleg szélsőségek számának összességében bekövetkezett csökkenése az elmúlt évszázadban egy olyan éghajlatra utal, amely kevésbé hajlamos a szélsőségekre.

Ez a mintázat látható a 6.3.4. ábrán is. Az összes állomásra és mindegyik évre kiszámították a legmelegebb meleg évszak és a leghidegebb hideg évszak hőmérsékleteit. Ezután állomásonként kiszámították a különbségeket, és földrajzilag átlagolták az összes állomáson, így megkapták az egyes évekre vonatkozó helyi szélsőséges hőmérsékletek várható tartományának éves mértékét. A 6.3.4. ábra ennek a mutatónak a 15 éves utolsó átlagát mutatja, ami az elmúlt évszázadban egyértelműen csökkent.



6.3.4. ábra: Az egyes állomások legmelegebb meleg évszaki Tmax és leghidegebb hideg évszaki Tmin értékei közötti különbség 15 éves, a hosszú távú átlaghoz viszonyított különbségének átlaga. Forrás: Szerzői elemzés az USHCN adatai alapján.

Az egyes állomások legmelegebb nyári Tmax és leghidegebb téli Tmin értékei közötti átlagos különbség az elmúlt 126 évben körülbelül 5°F-kal csökkent. A csökkenés főként a melegebb téli Tmin értéknek köszönhető, de a nyári Tmax csökkenése is szerepet játszik. A Tmin emelkedése szorosan összefügg a meteorológiai állomások körüli mesterséges felületek növekvő jelenlétével az elmúlt több mint 100 évben (az úgynevezett városi hősziget-hatás; 3.3. szakasz, Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, valamint Spencer et al. 2025).

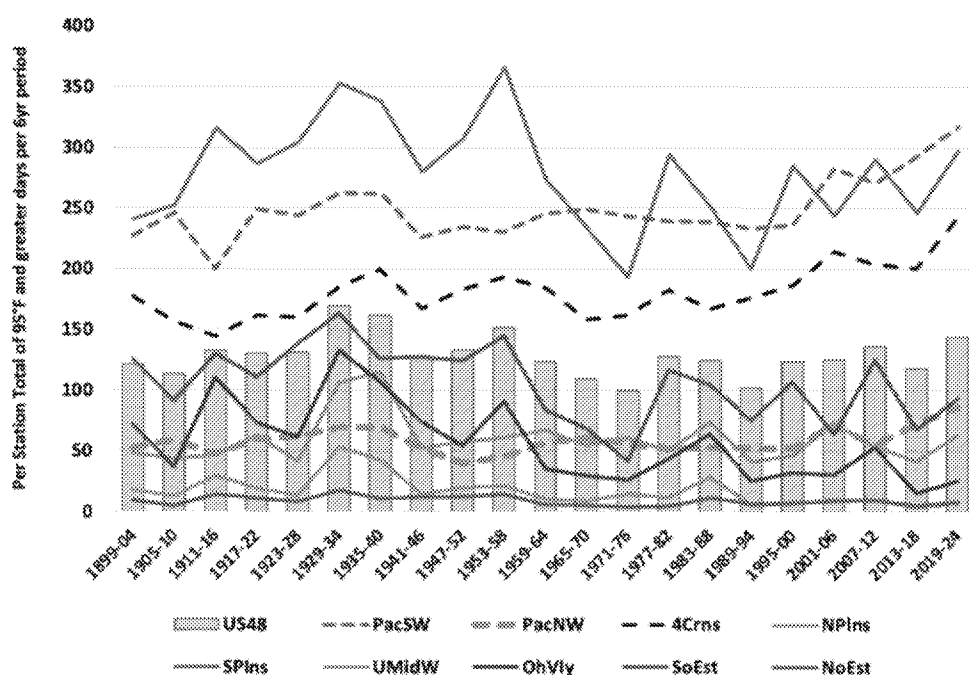
Összefoglalva, míg az Egyesült Államokban rendszeresen tapasztalhatók szélsőséges hőmérsékleti események, és nagy médiafigyelmet kapnak, a hosszú távú feljegyzések azt mutatják, hogy az Egyesült Államok éghajlata az idő múlásával kevésbé szélsőséges (enyhébbé) vált, ha a meleg évszak maximumai és a hideg évszak minimumai közötti tartományt mérjük.

6.3.2 Hőküszöb-túllépések

„A szélsőséges hőmérsékleti események kockázata változik” címszó alatt a legfrissebb amerikai nemzeti éghajlat-értékelő jelentés (NCA5) megjegyzi a 95°F-os vagy annál magasabb napok számának küszöbértékének növekedését, kijelentve:

Az Egyesült Államok nyugati részét az 1980-as évek óta különösen sújtja a szélsőséges hőség..., a 95°F feletti napok számának nagyobb növekedését tapasztalva, ami várható is volt a régióban a keleti USA-hoz képest nagyobb mértékű felmelegedés miatt. 2018 óta számos jelentős hőhullám sújtotta az Egyesült Államokat, köztük egy rekordot döntő esemény a Csendes-óceán északnyugati részén, 2021-ben.

Változik-e a 95°F-os napok előfordulása? Egy olyan változatos éghajlaton, mint a CONUS, a küszöbérték statisztikák félrevezetőek lehetnek. Egy olyan régióban, ahol sok állomás nyáron 95°F-hoz közeli Tmax átlaghőmérséklettel rendelkezik, a metrikában nagy ingadozások tapasztalhatók, amennyiben csak kis változások történnek az átlaghőmérsékletben. Másutt, ahol az állomások ritkán érik el, vagy gyakorlatilag mindig elérik a 95°F Tmax hőmérsékletet, egy kis változásnak nincs nagy hatása az eredményekre.



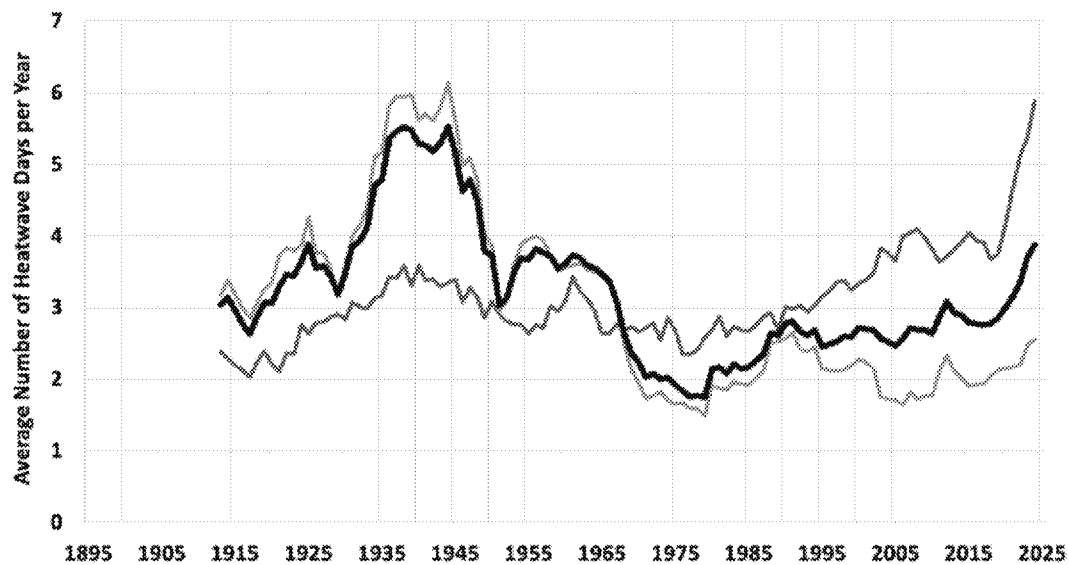
6.3.5. ábra: $\geq 95^{\circ}\text{F}$ napok száma 6 éves időszakokban, USA 48 (oszlopok) és régiók (vonalak). 6 éves időszakot használunk, mivel ez egyenletesen osztja el a 126 éves rekordot. Az eredmények robusztusak a 2 és 11 nap közötti időszakok használatára. USA 48: összefüggő amerikai államok. A régióneveket lásd a 6.3.2. ábrán. Forrás: Az USHCN adatainak szerzői elemzése.

Az elmúlt 126 évben az átlagos CONUS állomás 6 éves időszakonként 129 olyan napot tapasztalt, amikor a hőmérséklet meghaladta a 95°C -ot, de a regionális értékek 278-tól (Déli-síkság) 9-ig (Északkelet) terjednek. Ezért az ilyen küszöbérték-elemzéseket óvatosan kell értelmezni. A 6.3.5. ábra azt mutatja, hogy a kilenc régió közül csak háromban (mind a nyugati oldalon) tapasztaltak növekvő tendenciát a 95°F -os vagy annál melegebb napok számában (szaggatott vonalak). A CONUS egészében nem, a másik hat régióban pedig csökkenés tapasztalható.

Az NCA5 idézetben említett 2021-es csendes-óceáni északnyugati hőhullámot a 8.6.1. szakaszban részletesebben is megvizsgáljuk. A bizonyítékok arra utalnak, hogy ez egyetlen, példa nélküli esemény volt a feljegyzésekben, és nem része a fokozódó szélsőséges hőség mintázatának. Például az 5 napos átlagos troposzférikus rácspont-hőmérsékleti anomália a csendes-óceáni északnyugati régióban az esemény során $+10,8^{\circ}\text{C}$ volt, ami az északi félteke legszélsőségesebb rácspont-nyári anomáliája az elmúlt 46 évben, több mint 4 millió rácspont alapján. Ezzel szemben a globális hőmérsékleti anomália ebben az időszakban gyakorlatilag nulla volt ($+0,03^{\circ}\text{C}$, Mass et al. 2024).

6.3.3 Hőhullámok

A hőhullámoknak (egymást követő napoknak, amelyek meghaladják az extrém küszöbértéket) nagyobb társadalmi hatásuk van, mint egyetlen napi rekordhőmérsékletnek. A „hőhullám napokat” itt úgy mérjük, mint az összes olyan nap számát május-szeptemberben, amelyek meghaladják az adott nap 90. percentilisét, és amelyek legalább hat egymást követő napos időszakon belül esnek. Ez egyenértékű az NCA4-ben használt módszerrel, azzal a különbséggel, hogy a referencia-időszak itt a teljes 1899-2024 közötti idősor, míg az NCA4 a referencia-időszakot a hűvösebb 1961-1990 közötti időszakra csonkolta. (Az alább látható eredmények mintázata nem függ a referencia-időszak megválasztásától.) Ez a csonkolás növeli a pozitív eredményeket (a 90. percentilist meghaladó napok) a referencia-időszaknál melegebb években, különösen 1960-tól kezdődően és a jelenig terjedően (lásd a 6.3.6. ábrát és az alábbi tárgyalást).

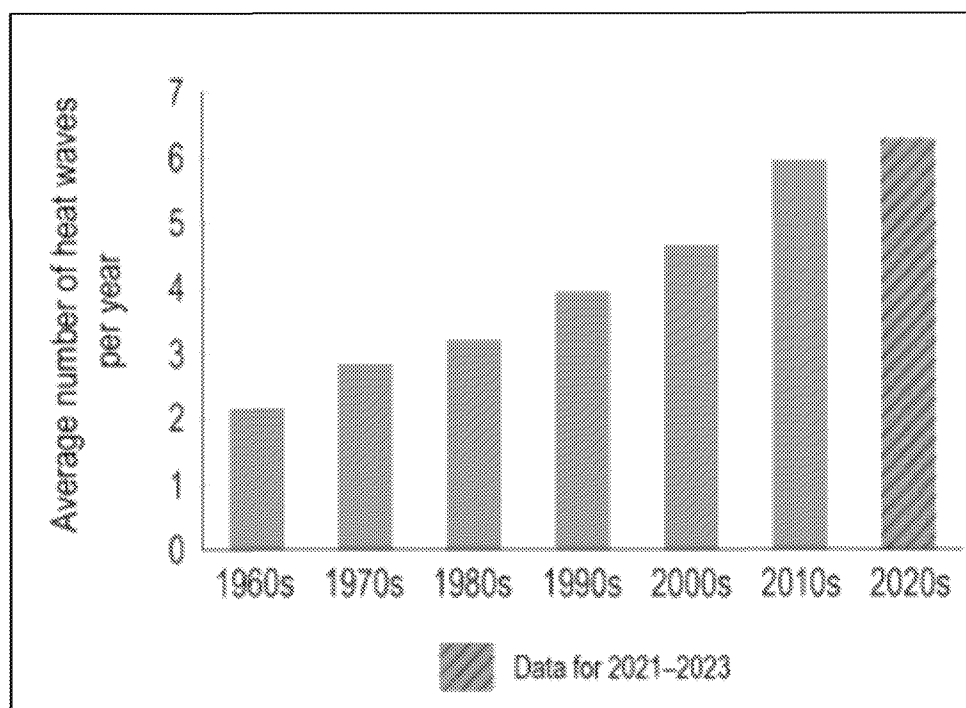


6.3.6. ábra: A hőhullámos napok számának 15 éves átlaga állomásonként a CONUS-ban (fekete vonal) és két régióban: Nyugat (piros), Közép-Kelet (zöld).

A 6.3.6. ábra azt jelzi, hogy a hőhullám-aktivitásban regionális eltérések vannak. A 20. század első felének túlzott hősége elsősorban az ország keleti kétharmadában jelentkezett, míg a közelmúltban a hőhullámos napok számának növekedése Nyugaton tapasztalható (NCA5). Ez azt jelzi, hogy a háttér meleg évszaki cirkulációja a 20. század első felében a keleti országrészekben kedvezett a hőhullámoknak, de a 21. században a mintázatok a nyugati részekben kedveztek a hőhullámoknak. A CONUS egészére nézve a hőhullámok ma sem gyakoribbak, mint egy évszázaddal ezelőtt, ami összhangban van az NCA4-ből vett 6.4.1. ábra felső paneljével.

Ez a mutató régióként jelentősen eltérő. A négy északi régió (Csendes-óceáni ÉNY, Északi-síkság, Felső-Középanyugat és Északkelet) átlagosan 15-27 hőhullámos napot tapasztal 15 éves időszakonként. Ezzel szemben az öt déli régió (Csendes-óceáni Délnyugat, 4-Corners, Déli-síkság, Ohio-völgy és Délkelet) 37-54 ilyen napot tapasztal, ami lényegében kétszer annyi. Ez arra utal, hogy a nyári cirkulációs mintázat a déli régiókban hajlamosabb az állandó eseményekre, míg az északi régiókban az átmeneti rendszerek gyakoribbak, és így lerövidítik ezeket a potenciálisan hosszabb eseményeket.

A hőhullámok elemzése jó példa arra, hogy miért fontos a teljes adatkészletek és a megfelelő mérőszámok figyelembevétele. Az NCA5 a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (USGCRP 2023) weboldalra irányítja az olvasókat, ahol megtekinthetik a városi hőhullámok évtizedenkénti számát az 1960-as évektől kezdve. Ezt a 6.3.7. ábrán mutatjuk be.



6.3.7. ábra: A városi hőhullámok átlagos száma évente 50 nagy amerikai nagyvárosi területen, de a szövegben kifejtett okok miatt ez egy félrevezető mutató. Forrás: <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (hozzáférés: 2025. május 22.).

Az ábra évtizedenként monoton növekedést mutat, az 1960-as években évente két előfordulás volt, a 2020-as években hat. A hőhullám használt definíciója az emberi kellemetlenségek szokatlan, de gyakorlatias mérőszáma – legalább két egymást követő nappól álló időszak, amikor a *minimális* látszólagos hőmérséklet (a hőmérséklet és a páratartalom kombinációja) meghaladja a 85. percentilist. Azt is meg kell jegyezni, hogy az adathalmaz az 50 legnagyobb amerikai városra korlátozódik.

A szokatlan hőhullám-definíció és a városi fókusz miatt az USGCRP (2023) által bemutatott, 1960 óta növekvő értékek a hosszú távú trendeket és az üvegházgáz-kibocsátás hatását illetően legalább két okból nem informatívak. Először is, ahogy a 6.3.1. és 6.3.6. ábrán látható, az 1960-as volt a leghidegebb évtized, az 1970-es pedig a második leghidegebb évtized az 1910-es évek óta, így ez a kezdő dátum az idősorban kedvez a növekedés kimutatásának. Másodszor, az 1960 utáni urbanizáció ezekben a városokban jelentős tényező a Tmin emelkedésében az állandósult Tmax-hoz és a közeli vidéki állomások Tmin-jéhez képest (Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, Christy et al. 2009, McNider et al. 2012). Ez nem zárja ki az éjszakai hőmérsékletek valódi emelkedését az Egyesült Államok nagyobb városaiban, és az ezekkel a változásokkal járó társadalmi hatásokat. Megjegyezzük azonban, hogy számos okból kifolyólag a nyári Tmax (különösen a vidéki területeken) jobb mérőszám a háttérklíma változásai által befolyásolt hőhullámok változásainak kimutatására, például ami a növekvő üvegházhatású gázkoncentráció miatt következik be (Christy et al. 2009). A CONUS egészére vonatkozóan az ebben a szakaszban található bizonyítékok arra utalnak, hogy az üvegházgáz-kibocsátás az urbanizáció és a természetes éghajlati változékonyság háttérében csekély vagy semmilyen hatással nem volt a hőhullámokra. Függetlenül a regionális trendek végső okától, a hőhullámoknak fontos társadalmi hatásai vannak, amelyekkel foglalkozni kell, amint azt a 10. fejezetben tárgyaljuk.

TUDÁSDOBOZ: A rövid adatsorok veszélyei

San Francisco jó esettanulmányt nyújt a rövid történelmi minták használatának korlátairól a szélsőséges események természetes változékonyságának jellemzésére. Tegyük fel, hogy San Francisco napi csapadékmennyiségéből az 1895 és 2024 közötti 130 éves mintát használjuk, és 3, 5, 14 és 30 napos csapadékrekorokat keresünk. Az eredményeket a 6.2. táblázat mutatja.

Event	Record (inches)	Year
3-day	6.94	2023
5-day	8.55	2023
14-day	12.62	2023
30-day	18.93	1998

6.2. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1895-2024

A rekordok mind a közelmúltbeli évekre összpontosulnak. 2023 kivételes évnek tűnik, és mivel a minta vége felé közeledik, arra utalhat, hogy az éghajlat veszélyesebb állapotba került, talán emberi hatások miatt. [A „2023” megjegyzés azt jelzi, hogy az esemény a 2022 augusztusa és 2023 júliusa közötti vízévben történt.]

De teljesen más képet kapunk, ha egy 45 évvel korábban, 1850-ben kezdődő adatsort használunk. A 6.3. táblázat azt mutatja, hogy a rekorddöntő események mind az 1860-as években történtek. Továbbá 2023 már nem is a 2. helyen áll, hanem a 3. vagy 4. helyre csúszik vissza. A két diagram adatainak összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1862-es és 1867-es szélsőséges csapadékesemények lényegesen több csapadékot tartalmaztak, mint az 1998-as és 2023-as események, a 14 és 30 napos összesített értékek pedig körülbelül 50 százalékkal magasabbak voltak.

Event	Record (inches)	Year	Rank of 130-yr extreme listed in Table 6.2
3-day	8.85	1867	3
5-day	9.80	1867	3
14-day	19.05	1862	4
30-day	28.25	1862	2

Table 6.3: Extreme rainfall records, San Francisco, 1850-2024.

6.3. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1850-2024.

A természetes változékonyság mértéke még jobban megmutatkozik, ha a paleoklíma-bizonyítékokat is megvizsgáljuk. Porter et al. (2011) felfedezték, hogy a legutóbbi 1800 évben legalább hat megavihar volt intenzívebb, mint a régiót sújtó, pusztító erejű 1861-62-es ARkStorm. Nyilvánvaló, hogy az ilyen szélsőséges események, amelyekre az 1895-2024-es idősorunkban „példátlan” volt, körülbelül 300 évente sújtják a régiót, bár 1895 óta nem történt ilyen.

E példa a viszonylag rövid éghajlati időszakok (~130 év) használatának korlátait szemlélteti az általános természetes változékonyság, és különösen a szélsőséges események jellegének és mértékének felmérésében. A természetes változékonyság teljes tartományának pontos ábrázolása minden attribúciós elemzésben elkerülhetetlen (8.6. szakasz). Az infrastruktúra-tervezők, a katasztrófavédelmi intézmények és az attribúciós kutatók akkor értenék meg egy jövőbeli szélsőség nagyságának jelentős téves jellemzését, ha csak az elmúlt 130 év megfigyeléseire alapoznának. Ebben az esetben egyetlen 130 éves időmintavétel akár 50 százalékkal is alábecsüli azt a szélsőséges értéket, ami mindössze 45 évnyi megfigyelés hozzáadásával határozható meg. Az ezreréves léptékű paleoklíma bizonyítékokhoz képest még nagyobb alulbecslés történne. Fontos tanulság, hogy az éghajlat önmagában is okozhat nagy meglepetéseket, még emberi befolyás nélkül is.

6.4 Szélsőséges csapadék

Az AR6 értékelése szerint az 1950-es évektől kezdődő adatokban a heves csapadékmennyiség növekedését figyelték meg.

AR6: Az 1950-es évek óta **a heves csapadékesemények gyakorisága és intenzitása nőtt** a legtöbb olyan szárazföldi területen, amelyről a megfigyelési adatok elegendőek a trendelemzéshez (nagy megbízhatóság). (SPM A3.2)

AR6: Észak-Amerikában szilárd bizonyítékok vannak arra vonatkozóan, hogy a szélsőséges **csapadékmennyiség nagysága és intenzitása nagy valószínűséggel nőtt** az 1950-es évek óta. Mind az [egynapos maximumok], mind az [5 napos maximumok] jelentősen megnöttek Észak-Amerikában 1950 és 2018 között. (11. fejezet, 1560. o.)

Az Egyesült Államok nemzeti éghajlat-értékelései (NCA4, NCA5) kiemelték a leghevesebb (különféle módokon definiált) csapadékesemények előfordulásának növekedését, elsősorban a CONUS keleti felében, különösen az északkeleti részén, akár 1901-ben, akár 1958-ban kezdődik az elemzés. Érdekes módon a regionális eltérések azt mutatják, hogy a szélsőséges csapadékesemények legnagyobb növekedése északkeleten, a legkisebb pedig nyugaton figyelhető meg, ami ellentétes a hőmérsékleti szélsőségek változásaival (6.3.6. ábra).

McKitrick és Christy (2019) hosszú távú és következetes állomási megfigyeléseket végeztek a szélsőséges napi csapadékmennyiségről, hogy teszteljék az NCA állításainak egy részét a délkeleti és nyugati partra vonatkozóan egy olyan trendmodell segítségével, amely nem paraméteres varianciabecslést tartalmazott, és ami robusztus a csapadékadatok komplex autokorrelációs tulajdonságaival szemben. Amikor az idősorokat visszafelé kiterjesztették (egyes esetekben akár 1872-ig), vagy később (1978) kezdtek, egyik régióra sem kaptak szignifikáns trendet.

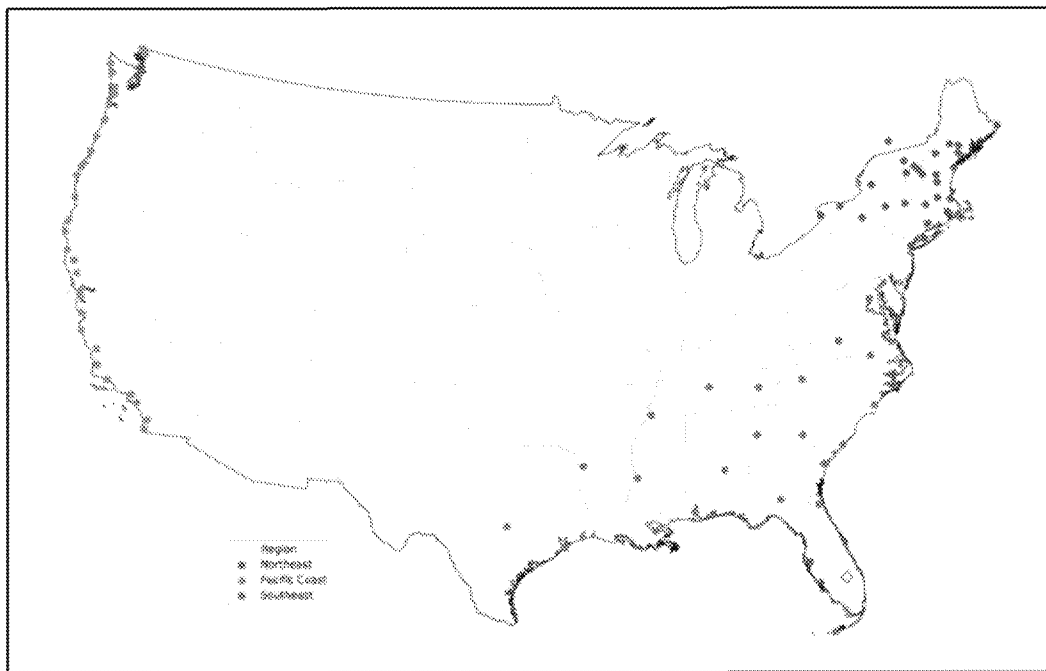
Ezen eredményeket ehhez a jelentéshez (McKitrick és Christy 2025) hasonlóan felépített megfigyelésekkel frissítettük: 29 állomással a CONUS csendes-óceáni partvidékén (1893, San Diegótól (Kalifornia) Blaine-ig (Washington)) és 24 állomással a párás délkeleten (1872, Austintól (Texas) Washington DC-ig). Továbbá az északkeleti területet 27 állomással bővítettük (1888, Buffalótól (New York) Eastportig (Maine)). A helyszíneket a 6.4.1. ábra mutatja. Az állomásokat a hosszú távú, kiváló minőségű adatok elérhetősége alapján választottuk ki. A régiók mindegyike mutatja a szélsőséges csapadékviselkedés fontos jellemzőit: a csendes-óceáni partvidék a partra érkező légköri folyókkal van összefüggésben, amelyek esetében az AR6 1948 óta növekvő aktivitásról szolgáltat bizonyítékokat, és azt állítja, hogy a világ melegeedésével további növekedés várható (AR6 8.3.2.8.2); az NCA jelentése szerint az északkeleten tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb mértékű növekedését. Az NCA-k a délkeleti területet is megemlítték, mint a szélsőséges események megnövekedésével jellemzett területet. McKitrick és Christy (2019) elemzését alkalmazva a régiónkénti eredmények (és azok magyarázatai) a következők voltak.

Heves esőzések a Csendes-óceáni parton

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje statisztikailag szignifikáns (csökkenő) Astoriában, (Oregonban); máshol nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és szignifikáns Big Surben (Kaliforniában); máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Aberdeenben (Washington államban) és Big Surben (Kaliforniában), valamint negatív és szignifikáns az Oregonbeli Newportban (máshol nem szignifikáns).

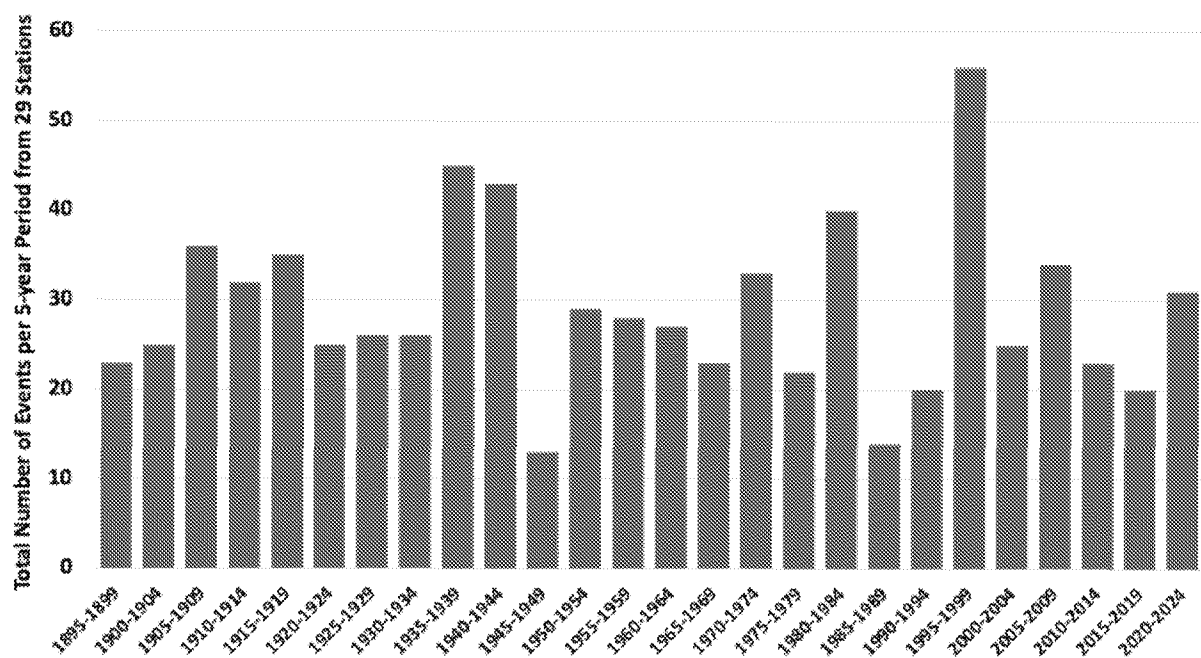
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

A Csendes-óceáni partvidék jelentős mennyiségű csapadékot kap a légköri folyók (AR) eseményeiből, amelyek gyakran tartanak egy-két napnál tovább (pl. Gershunov et al. 2017, Pan et al. 2024). A közelmúlt történelmének legrosszabb ilyen eseménysorozata az úgynevezett ARkStorm volt, amely 1861 decemberében és 1862 januárjában történt; Kalifornia egyes részeinre közel 3 méternyi esőt zúdított, és a teljes Central Valley-t hetekre helyenként 4,5 méternyi vízzel borította (Brewer 1930, Null és Hulbert 2007). Ezenkívül paleoklíma-kutatók Kaliforniában a legutóbbi 1800 évben hat, az 1861–1862-esnél hevesebb megárvírt találtak, körülbelül 300 éves időközönként (Porter et al. 2011).

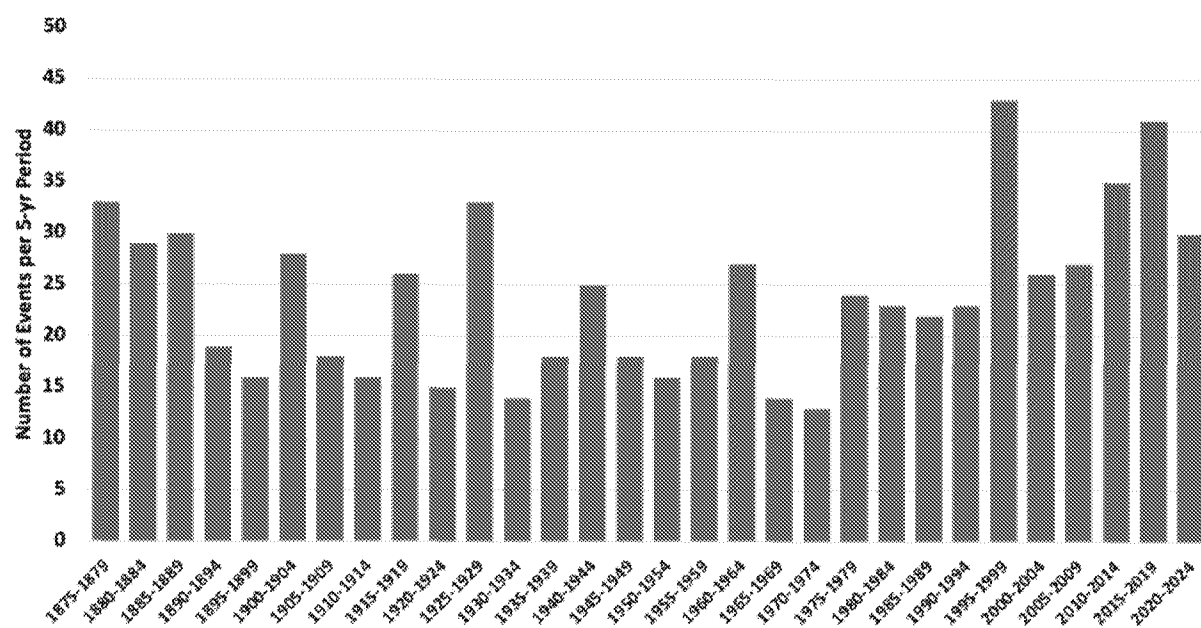


6.4.1. ábra: A jelentésben használt csapadékmérő állomások helyszínei. Narancssárga: Csendes-óceáni partvidék. Kék: Északkelet. Zöld: Délkelet. Adatok: McKittrick és Christy (2025).

Az 5 napos özönvizek előfordulását a következőképpen vizsgáljuk meg. A csendes-óceáni partvidéket példaként véve, egy 130 éves időszak 5 éves intervallumotkból 26-ot tartalmaz. Minden helyszínre kiszámítottuk az év 5 napos csapadékösszegét, és kiválasztottuk a mintában a 26 legmagasabb értéket. Egyetlen évben a 26 leghevesebb közül több is előfordulhat. Ezek mindegyike 5 évente 1-szer előforduló eseménynek tekinthető. Ha nincsenek trendek a csapadékmennyiségben, akkor ezeknek az eseményeknek az összes állomáson egyenletesen kell eloszlania az évek során. A 6.4.2. ábrán ezen események időbeli eloszlását mutatjuk be a csendes-óceáni parton. Jól láthatóak az 1997-98-as nagyszabású El Niño eseményhez kapcsolódó özönvizek. Bár szeszélyesek, ahogy az az ilyen csapadékmennyiség-mérőszámokra jellemző, nincs arra utaló jel, hogy idővel gyakoribbá válnának.



6.4.2. ábra: A 26 legsúlyosabb (5 évenként 1) előfordulás időbeli eloszlása 5 éves időszakokra a csendes-óceáni parton található 29 állomáson.



6.4.3. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a legsúlyosabb 30 (5 évenként 1) eseményre vonatkozóan 24 állomáson a párás délkeleti régióban, Austintól Washington DC-ig, 5 éves időszakokra bontva, 1875-2024 között.

Délkeleti heves esőzések

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama) és Quitman-ben (Georgia), de másutt nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama), de másutt nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Vicksburg-ban (Mississippi) és Norfolk-ban (Virginia), de másutt nem szignifikáns.
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

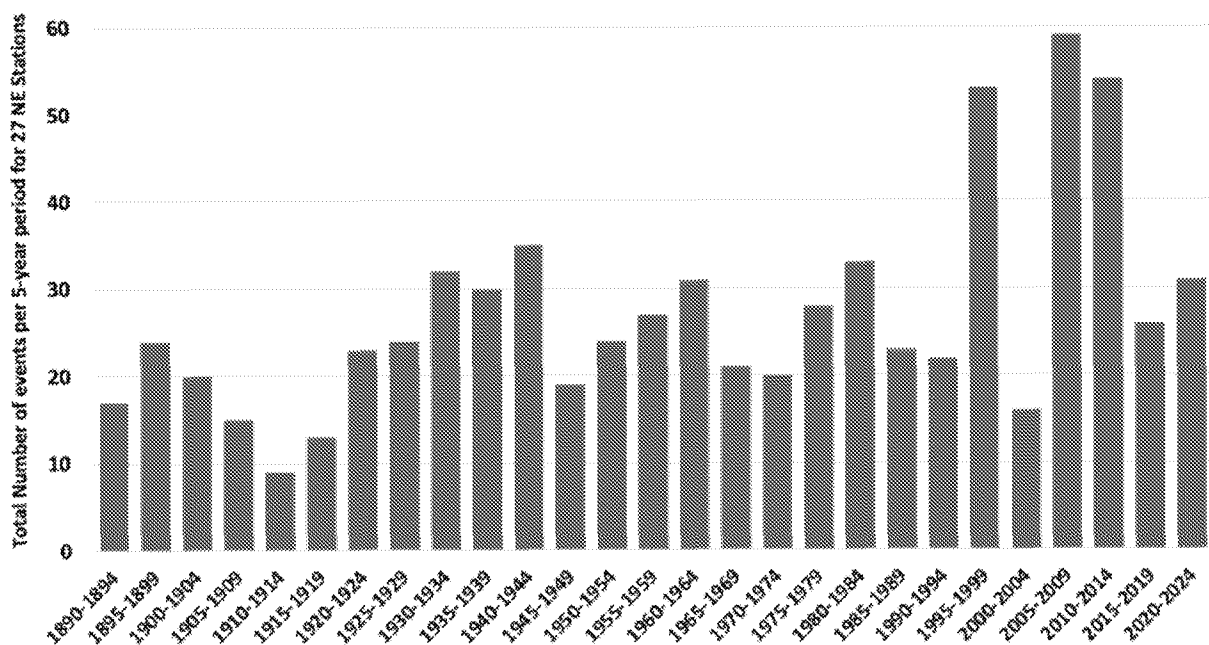
A 6.4.3. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 150 évre vonatkozóan a délkeleti párás zónában. Az 5 évente 1 alkalommal előforduló heves esőzések 5 napos összesítéseinek időbeli mintázata általában nem figyelemre méltó, bár 1995 és 2019 között magasabb értékek csoportja jelenik meg. Az ezekben az években tapasztalt növekedés nagyrészt a 4 legészakkeletibb állomásnak köszönhető: Wilmington NC, Weldon NC, Washington DC és Norfolk VA. Ez megerősíti az NCA4 és NCA5 által jelzett mintázatot – a heves esőzések gyakoriságának növekedését a trópusi viharok keleti (Észak-Karolinától Maine-ig tartó) időbeli csoportosulása miatt, amelyet alább tárgyalunk. Egyébként a fennmaradó 20 állomás a heves esőzések időbeli eloszlása szempontjából nem figyelemre méltó.

Északkeleti heves esőzések

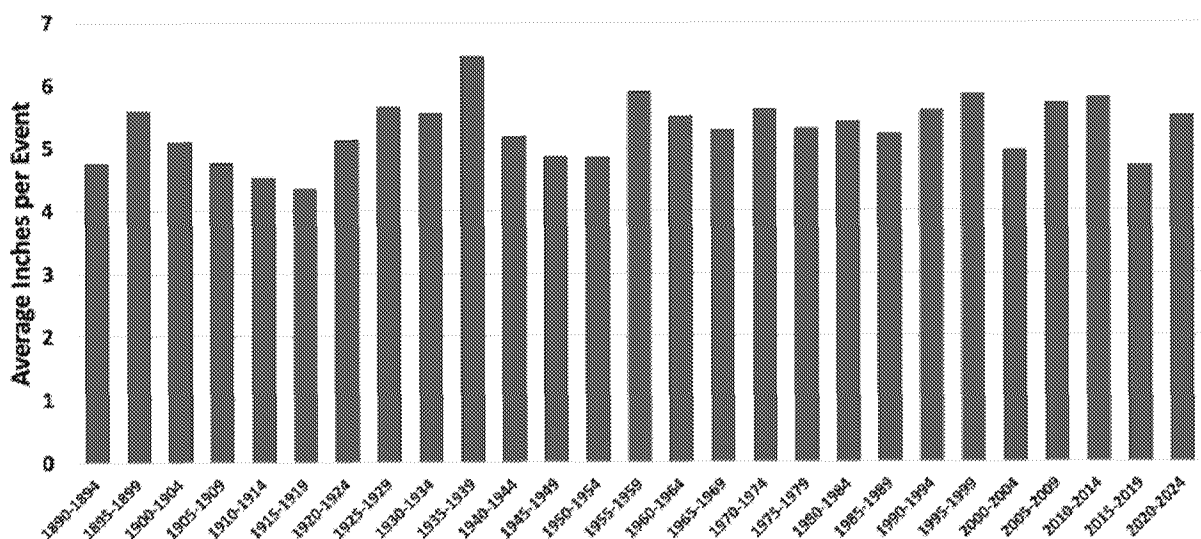
- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns a 27 helyszínből 12-ben, valamint a regionális átlagban is.
- A csapadékmennyiség ingadozásának trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Albany NY, Buffalo NY és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Gardiner ME és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A régió összes állomására átlagolva sem a csapadékmennyiség ingadozásában, sem a maximum csapadékmennyiségben nincs statisztikailag szignifikáns trend.

A 6.4.4. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 135 évben az északkeleti 27 állomáson (beleértve Montrealt is Kanadában). Itt 3 napos összesítéseket használunk, mivel ez eredményezte a legnagyobb időbeli eltéréseket. Ebben a régióban az események 77 százaléka júniustól októberig következik be, és hurrikánok, trópusi viharok vagy extratrópusi rendszerekbe átmenő trópusi viharok betörései dominálnak bennük. Az NCA4 és NCA5 szerint ebben a régióban tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb növekedését, ezért ezt érdemes közelebbről megvizsgálni.

Észrevehető a szélsőséges események egyfajta csoportosulása 1995 és 2014 között. Howarth et al. (2019) egy hasonló régiót vizsgáltak, mint ami a 6.4.4. ábrán szerepel. Magában foglalja Pennsylvaniát és New Jersey-t, és jelentős különbségekről számoltak be a különböző csapadékszélsőségekben két 18 éves időszak (1979-96, 1997-2014) között. A 6 hüvelyknél nagyobb 24 órás események 317 százalékos növekedését mutatták ki. Mi ugyanezen évekhez képesen 58 százalékos növekedést tapasztaltunk. A 6.4.4. ábra azonban azt mutatja, hogy a gyakoriság 2014 után meredeken csökken, és a következő 5 éves intervallumokban visszatér a hosszú távú átlaghoz, ami ismét illusztrálja a rövid távú trendekből levont következtetések veszélyeit, amikor nagy változások vannak.



6.4.4. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a leghevesebb 27 (5 évente 1 alkalommal előforduló) 3 napos csapadékeseményre vonatkozóan 27 északkeleti állomáson New Yorktól ME-ig, beleértve Montrealt is.



6.4.5. ábra: Az 5 évente 1 alkalommal előforduló események során hulló átlagos csapadékmennyiség az északkeleti állomásokon.

A Howarth et al. mintájában tapasztalt magas százalékos növekedés viszonylag kevés helyszínen kis számokkal jár együtt: 58 állomáson az első időszakban mindössze 6, a másodikban pedig 25 eset történt. A legtöbb állomás nem regisztrált ilyen eseményt. Ha régiószerte növekedés tapasztalható a heves eseményekben, akkor annak az összes állomás átlagában látszania kell. A 6.4.5. ábra az ÉK-i 1:5 évente előforduló események átlagos csapadékmennyiségét mutatja. A tendencia mindössze +0,04 hüvelyk/évtized. A legmagasabb mennyiség, 1935-39, magában foglalja az 1938-as Nagy Új-Angliai Hurrikánt, amely egyike volt a régiót sújtó ritka jelentős (3-as vagy magasabb kategóriájú) hurrikánoknak. A 6.4.4. és 6.4.5. ábrákon látható eredmények tehát arra utalnak, hogy

bár az 1995 és 2014 közötti időszakban néhány helyszínen megugrott az események száma, a minta, nem volt regionális, és a változás 2014 után nem maradt fenn.

Jong et al. (2024) az északkeleti régió csapadékeseményeiben 1959 óta a trópusi hatások növekedését dokumentálja, és arra a következtetésre jutott, hogy „az őszi szélsőséges csapadéktrend az USA északkeleti részén az 1990-es évek óta elsősorban a trópusi ciklonokhoz kapcsolódó eseményeknek tulajdonítható.” A kérdés tehát a következő: „A trópusi rendszer 1997 és 2014 közötti, az északkeleti régiót érintő időbeli csoportosulása az emelkedő üvegházgáz-koncentrációra adott válasz volt-e?” Jong et al. megvizsgálták a CMIP-6 modell eredményeit, amelyek azt sugallják, hogy a 21. században kevesebb ilyen rendszer lesz, de a csapadékesemények intenzitása növekedhet. Ez a feltételezés nem látható a 6.4.5. ábrán, ahol a 135 éves időszak alatt az eseményenkénti mennyiség állandó maradt.

Vannak bizonyítékok arra, hogy a leghevesebb csapadékesemények újraeloszlhatnak a városi infrastruktúra helyi időjárásra gyakorolt hatása miatt (pl. Pielke Sr. et al. 2011, Zhang et al. 2018, Yang et al. 2024). Yang et al. kijelentik: „A kompakt beépítésű városokban a belvároshoz képest nagyobb mértékű a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés tapasztalható, mint a vidéki környezetben, míg a szétszórótt beépítésű városokban a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés csökken.” Bár ez egy fontos szempont, az ebben az elemzésben használt konkrét állomásokra gyakorolt hatás ismeretlen, vagy legalábbis nem mutatható ki a 6.4.5. ábrán.

Összefoglalva, egyes amerikai régiókban rövid ideig tartó növekedés tapasztalható a szélsőséges csapadékeseményekben, ami összhangban van a természetes változékonysággal. A hosszú távú, országos történelmi feljegyzések elemzése azonban, amely figyelembe veszi a csapadékadatok autokorrelációs tulajdonságait, nem támasztja alá azt az állítást, hogy a szélsőséges, rövid ideig tartó csapadékesemények gyakoribbak vagy intenzívebbek lennének.

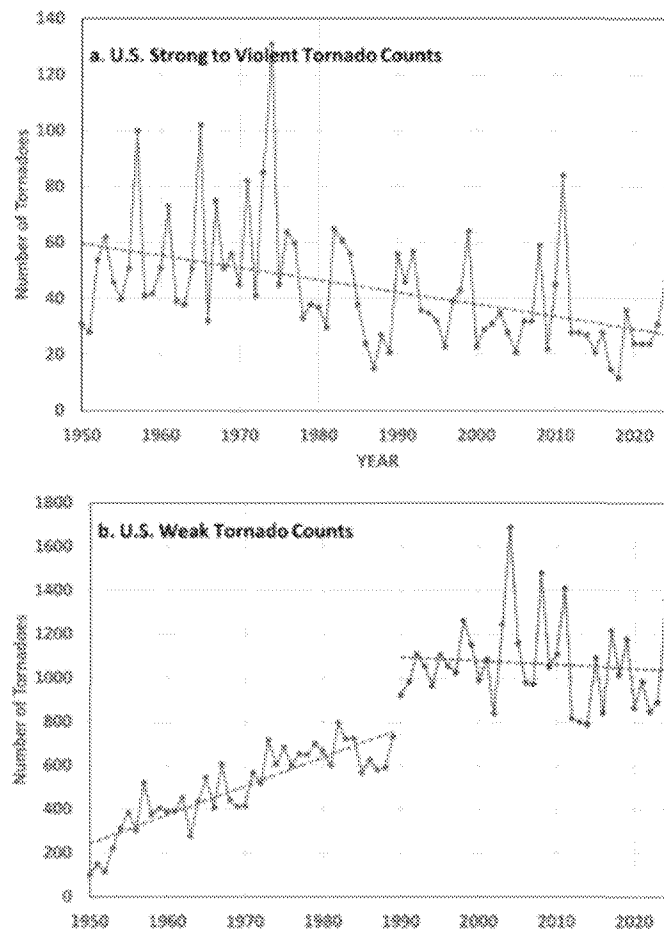
6.5 Tornádók

Az AR6 a következőképpen értékeli a tornádók trendjeit az Egyesült Államokban:

[A] súlyos konvektív viharokhoz kapcsolódó tornádók, jégesők és villámlások megfigyelési trendjei nem észlelhető megbízhatóan a hosszú távú megfigyelések elégtelen lefedettsége miatt. *Közepes megbízhatóságú*, hogy az Egyesült Államokban a tornádók átlagos éves száma viszonylag állandó maradt. (11. fejezet, 11.7.3. szakasz, 1594. oldal)

A gyenge tornádók megfigyelése az idők folyamán megváltozott. A vidéki népesség növekedése és a kézi eszközökkel történő videofelvételkészítés növekvő lehetősége, ahhoz vezetett, hogy gyakrabban tettek jelentést minimális károkat okozó gyenge tornádókról. Ezzel szemben az erős és heves tornádók megfigyelése idővel következetesebb lett. Megjegyzendő, hogy a tornádó erősségét az általa okozott károk alapján mérik, nem pedig a tölcser vizuális megjelenése alapján. A korábbi évtizedekben a korlátozott valós idejű megfigyelési képességek nem akadályozták meg az azonosítást, mivel az erős és heves tornádók sokkal nagyobb károkat okoznak, amelyeket később fognak felmérni, még akkor is, ha magát a tornádót nem figyelték meg. Amióta 1950-ben elkezdődött a statisztika, jelentősen (körülbelül 50%-kal) csökkent az erős és heves tornádók száma, amint azt a 6.5.1a. ábra is mutatja.

Összefoglalva, 1950 óta az Egyesült Államokban a súlyos tornádók száma észrevehetően csökkenő tendenciát mutat. 1990 után az Egyesült Államokban a gyenge tornádók száma nagyjából állandó maradt; az azt megelőző adatok hiányosak a megfigyelés korlátozottsága miatt.



6.5.1. ábra: Az Egyesült Államokban évente előforduló tornádók száma (a) erős és heves tornádók (EF3-tól EF5-ig) és (b) gyenge tornádók (EF0-tól EF2-ig) tekintetében. A NOAA Viharelőrejelző Központ adatai alapján, amelyek a https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv címen érhetők el.

6.6 Árvizek

Az árvizekben bekövetkezett változásokat a következőképpen értékelték:

AR6: Globális szinten megfigyelt változások tekintetében az árvizek nagyságrendjére vagy gyakoriságára az SREX *alacsony megbízhatósági szintet* mért. Ezt az értékelést megerősítette az AR5 jelentés is. Az SR15 egyes régiókban az árvízgyakoriságnövekedést és szélsőséges vízhozamot talált, más régiókban viszont csökkenést. . . [A] megfigyelt árvízváltozásokról szóló hidrológiai szakirodalom heterogén, regionális és szubregionális medenceszintekre összpontosít, ami megnehezíti a globális, és néha regionális szintek szerinti szintézist. (11.5. fejezet)

AR6: A hideg régiókban, ahol a felmelegedésre válaszul (nagy megbízhatósági szinten) a hóolvadás uralja az áramlási rendszert, az árvizek szezonális megváltozása megfigyelhető. Az elmúlt évtizedek csúcsát elérő trendjeivel kapcsolatos megbízhatóság globális szinten *alacsony*. (11.5. fejezet)

NCA4: Az extrém magas vízhozamértékek trendjei vegyesek az Egyesült Államokban. 200 amerikai vízfolyásmérő elemzése növekvő és csökkenő árvízi nagyságú területeket is mutat, de **nem szolgáltat szilárd bizonyítékot** arra vonatkozóan, hogy ezek a tendenciák emberi hatásoknak lennének tulajdoníthatók (240-241. o.)

Az árvizekben USA-szerte kimutatható trendek hiánya összhangban van a 6.4. szakaszban szereplő megállapítással, amiszert a szélsőséges csapadékmennyiségben nem mutatkozik koherens változás.

6.7 Szárazság

Az aszálytrendek értékelése a következő volt.

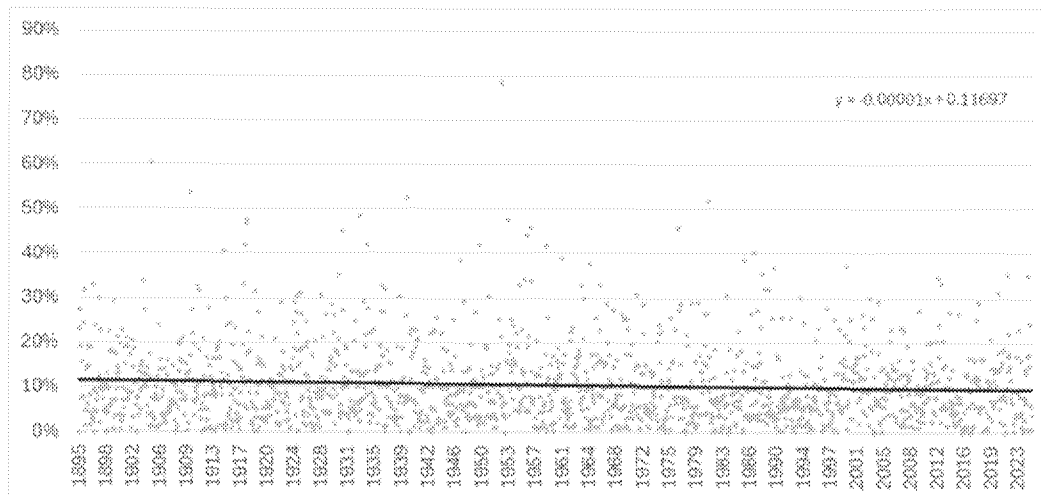
AR6: Kevés AR6 régióban figyeltek meg a meteorológiai aszály növekedését (11.9. szakasz, 1575. o.),

AR6: A mezőgazdasági és ökológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg minden kontinensen (*közepes megbízhatóság*), de csak egy AR6 régióban csökkenést (*közepes megbízhatóság*). A hidrológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg néhány AR6 régióban. (11. fejezet összefoglalása)

NCA4: A megnövekedett csapadékmennyiség következtében az **aszálystatisztika az egész CONUS-ban csökkent**. (233. o.)

NCA4: A közelmúltbeli aszályok és a kapcsolódó hőhullámok rekordintenzitást értek el az Egyesült Államok egyes régióiban; földrajzi léptékét és időtartamát tekintve azonban az **1930-as évekbeli** porvihar-korszak történelmi feljegyzései **továbbra is referencia aszályának és szélsőséges hőség eseményének** számít (nagyon magas megbízhatóság). (231. o.)

SREX: A paleoklíma szempontból a közelmúltbeli aszályok nem példa nélküliek, súlyos „megaszárazságokról” számoltak be a paleoklíma-feljegyzésekben Európából, Észak-Amerikából és Ausztráliából. (170. o.)



6.7.1. ábra: A „nagyon száraz” minősítés havi százalékos aránya az USA-ban, 1895–2025. Adatforrás: NOAA <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0>, amihez a legkisebb négyzetes trendvonal hozzá lett adva.

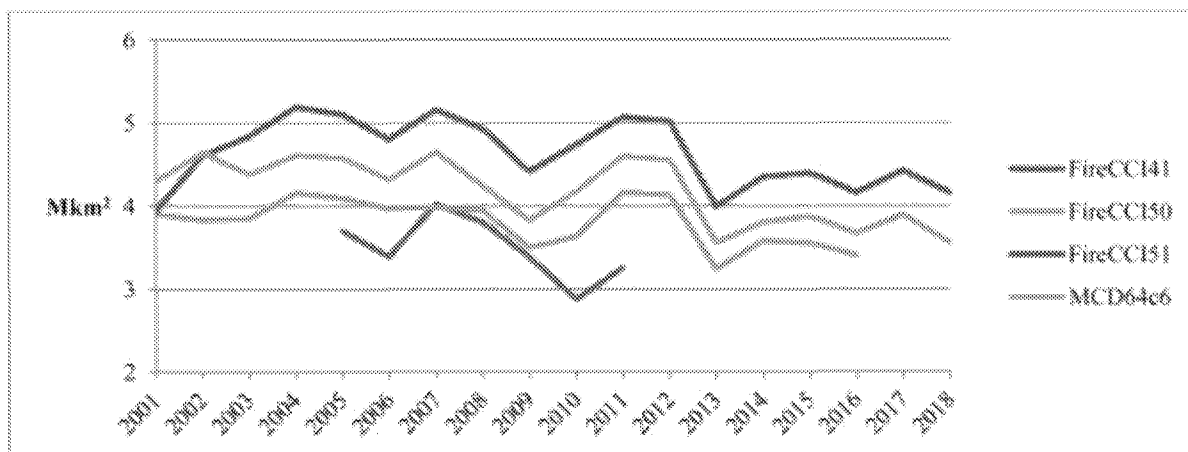
Amint a 6.7.1. ábrán látható, az Egyesült Államok hosszú távú adatai a szélsőséges szárazságban jelentéktelenül csökkenő tendenciát mutatnak (-0,001 százalék évente).

Kogan et al. (2020) egy 38 éves, nagy felbontású, műholdas aszálymérést vizsgált, és arra a következtetésre jut, hogy a globális aszály nem erősödött fel, és nem kapcsolódik az éghajlatváltozáshoz: „határozottan kijelenthető, hogy a globális és a főbb gabonatermelő országok aszályos területeinek és intenzitásának trendjei az 1980-as évek óta nem követik a globális éghajlati felmelegedést.”

Összefoglalva, nincs bizonyíték arra, hogy az elmúlt évtizedekben az Egyesült Államokban vagy globálisan megnövekedett volna a meteorológiai aszályok gyakorisága vagy intenzitása.

6.8 Futótüzek

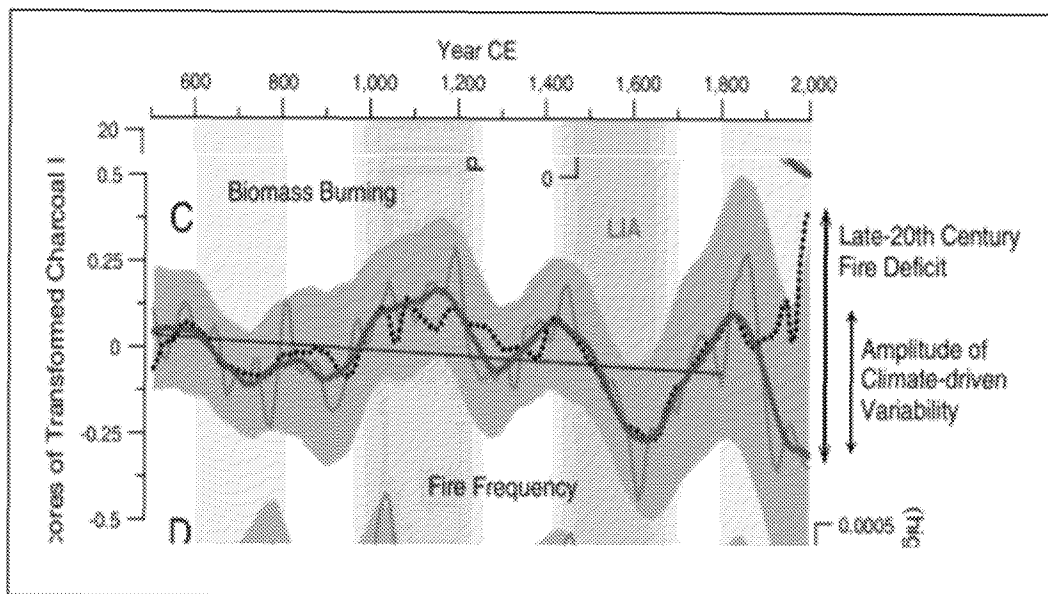
Az IPCC nem adott ki adatelemzést a futótüzek okairól. Amint a 6.8.1. ábra mutatja, az Európai Űrügynökség által mért globális futótűz-aktivitás a 21. században csökkenő tendenciát mutat.



6.8.1. ábra: Globális tűzvészek kiterjedése, 2001–2018. Forrás: Lizundia-Loiola et al. (2021) 12. ábrája alapján. A különféle színű vonalak különféle műholdakból és algoritmusokból származó adattermékeket jelölnek.

A globális adatok azt mutatják, hogy a futótűz-kiterjedtség minden kontinensen állandó vagy csökken (Samborska és Ritchie, 2024). Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy egyes régiókban a tűz-intenzitás rosszabbodik (Cunningham et al. 2024), és hogy a futótüzek 2001 és 2019 között a globális erdőborításban nettó csökkenést okoztak (Tyukavina et al. 2022).

Az Egyesült Államokban 1900-ben elkezdett aktív tűzoltási gyakorlat megnehezíti a futótűz-aktivitás természetes alapértékének meghatározását. A paleoklíma-bizonyítékok azt mutatják, hogy a múltbeli aktivitás sokkal magasabb volt, mint a mai. Marlon et al. (2012) üledékes faszénrétegeket használt az Egyesült Államok nyugati része tűztörténetének rekonstruálására az elmúlt 1400 évben, és emodelt is illesztett a tűzaktivitás éghajlati viszonyok függvényében történő előrejelzésére. Eredményeiket az alábbi 6.8.2. ábra foglalja össze (a cikkük 2. ábrájából). A 20. században egyre nagyobb a futótüzek hiánya. Más szóval, bármennyi tüzet is figyeltek meg a 20. században, az kevesebb volt, mint amit az éghajlati viszonyok alapján az előző évszázadokban megfigyelhettek volna. Parks et al. (2025) hasonlóan állapított meg: az észak-amerikai futótüzek égési területének közelmúltbeli növekedése ellenére a történelmi futótüzek gyakoriságához képest továbbra is jelentős futótűz-hiány áll fenn.

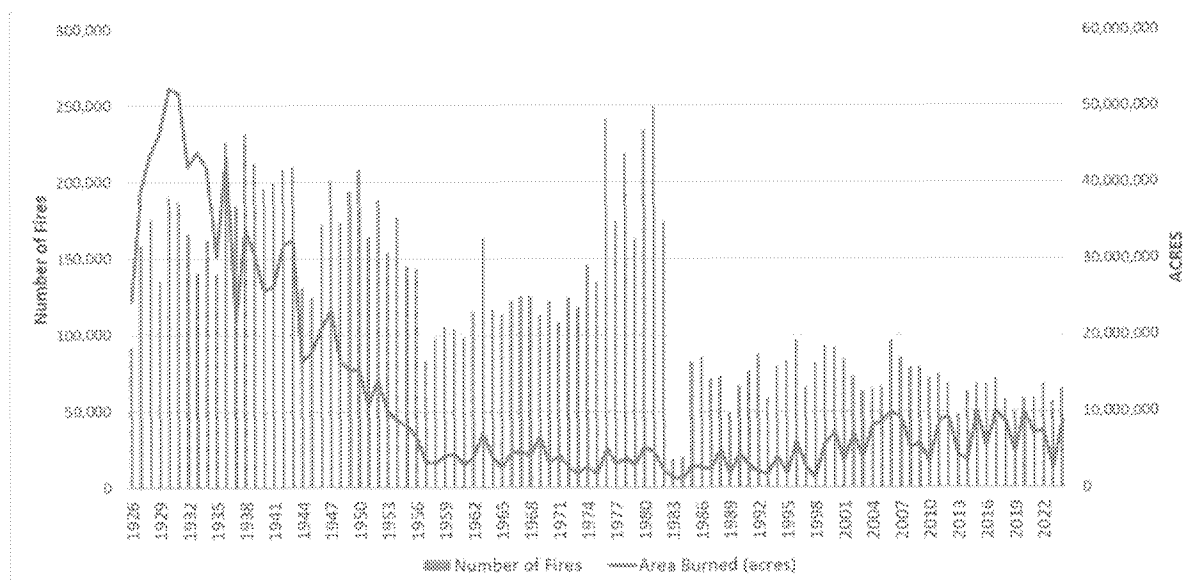


6.8.2. ábra: Tűzgyakoriság és tűzhiány az Egyesült Államokban. A piros vonal a simított faszénrekordot, a fekete szaggatott vonal pedig az éghajlati viszonyok alapján előrejelzett faszénrekordot mutatja. Forrás: Marlon et al. (2012) 2. ábra.

Az amerikai Nemzeti Ügynökségek Közötti Tűzoltóközpont (NIFC) 1926 és 2023 közötti adatait a 6.8.3. ábra mutatja. Az NIFC eltávolította az 1960 előtti adatokat jelenlegi weboldaláról, azzal az indokkal, hogy a mérési módszerek 1960 után megváltoztak, így az összehasonlítás megbízhatatlanná válik. Mindazonáltal, ha csak az 1985 utáni időszakra koncentrálnunk, a tüzek száma nem növekszik. A leégett terület valóban nőtt, de csak körülbelül 2007-ig.

Az erdő- és bozóttüzek mindig is részét képezték a természetnek, és minden bizonnyal teremthetnek olyan körülményeket, amelyek rövid távon minden élőlény számára, beleértve az embert is, barátságtalanok. A tudomány megerősítette a futótüzek általános előnyeit és szükségességét. Míg a közelmúltbeli nagy horderejű tüzek és évszakok emlékeztetnek a potenciális pusztító hatásra, a legnagyobb horderejű amerikai futótűz továbbra is az 1910-es ún. nagy robbanás az Egyesült Államok nyugati részén, ami több mint hárommillió hektárt pusztított el, és egész városokat semmisített meg, mint például Taft, MT (Apple, 2020). Az 1910-es tűzvész átalakította az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálatát (National Forest Foundation 2022), ami a tűzoltásra helyezte a hangsúlyt, elsődleges célként az összes erdő- és bozóttűz megfékezését tűzve ki (Forest History Society, 2022). Ez vezetett az 1935-ös „10 órás szabályhoz”, amely előírta, hogy minden, bármely napon észlelt tüzet másnap reggel 10 óráig meg kell fékezni (National Forest Foundation, 2022).

Nemes célnak tűnik ugyan mindenféle futótűz elfojtása, felmerültek a kérdések, hogy ez a viselkedés vajon „követi-e a tudományt” (U.S. Forest Service, 2022). Idővel az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálat elkezdte újragondolni céljait, felismerve, hogy az olyan új megközelítések, mint az előírt égetések, a tüzelőanyagok kiküszöbölése és az ellenőrzött erdőtüzek megfelelőbbek (Sommer, 2016). A legújabb kutatások igazolják ezt a megközelítést, és elismerik, hogy a gyakoribb kisebb tüzek valószínűleg egészségesebb erdőket, vízi ökoszisztémákat és biológiai sokféleséget eredményeznek (Stephens et al., 2021).



6.8.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli erdő- és bozóttüzek száma 1926 és 2023 között. Forrás: 2018 utáni adatok: National InterAgency Fire Center adatok <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>. 2017 előtti adatok: webarchive.org (dátum nélkül)

Hivatkozások

- Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. The Spokesman-Review. <https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/>
- Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, “Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity,” *Journal of Climate* 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, <https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1>.
- Brewer, W. H. (1930). *Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer*. University of California Press.
- Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342–3356. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1>
- Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature’s style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23). <https://doi.org/10.1029/2005GL024476>
- Colorado State University. (2025). Realtime tropical cyclone guidance. <https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php>
- Cunningham, C.X., G.J. Williamson, and D. Bowman (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology and Evolution* 8, 1420–1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Forest History Society (2022). The 1910 fires. <https://foresthistory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/>
- Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052979>
- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017GL074175>
- Goldenberg, Stanley et al., “The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications,” *Science* 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, <https://doi.org/10.1126/science.1060040>.
- Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 673–689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 776–808.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. *Earth's Future*, 12, e2023EF004370. <https://doi.org/10.1029/2023EF004370>
- Karl, T.R., H.F. Diaz, and G. Kukla. (1988): Urbanization: Its detection and effect on the United States climate record. *Journal of Climate*, 1, 1099-1123 https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/1/11/1520-0442_1988_001_1099_uidaei_2_0_co_2.xml
- Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.
- Klotzbach, Phil et al. (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1>.
- Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) “Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security” *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 11(1)
- Koutsoyiannis, D. (2013) *Hydrology and Change*. *Hydrological Sciences Journal* 58(6) <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>
- Lizundia-Loiola, J., et al. (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 236, 111493, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>
- Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6, 399–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin et al. (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA *Proceedings of the National Academy of Sciences* February 14 2012 <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>
- Maue, R. N. (2025). *Climatlas: Tropical cyclones*. <https://climatlas.com/tropical/>
- Maue, R. N. (2011) Recent historically low tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters* 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>
- McKittrick, R. and J.R. Christy (2025), “Data and Code for CWG2025 Report”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/by76s7rxfb.1
- McNider, R.T., G.J. Steeneveld, A.A.M. Holtslag, R.A. Pielke Sr., S. Mackaro, A. Pour-Biazar, J. Walters, U. Nair, and J.R. Christy, 2012: Response and sensitivity of the nocturnal boundary layer over land to added longwave radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*., 117, D14106, doi:10.1029/2012JD017578.
- Null, J. and J. Hulbert, “California Washed Away: The Great Flood of 1862,” *Weatherwise* 60, no. 1 (2007): 26–30, <https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30>
- National Forest Foundation. (2022). Blazing battles: The 1910 fire and its legacy. <https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy>
- National Interagency Fire Center. (2024). Wildfire statistics. <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>
- NCA4. (2017). Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- NCA5. (2023). Fifth National Climate Assessment (A. R. Crimmins et al., Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1> (accessed May 22, 2025)
- NOAA Hurricane Research Division. (2025a). All U.S. hurricanes (1851–2019). https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

- NOAA Hurricane Research Division. (2025b). Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html
- Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, 12(11), 1434. <https://doi.org/10.3390/atmos12111434>
- Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. *Communications Earth and Environment*, 5, 378. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y>
- Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis et al. (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. *Nature Communications* 16 <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8>
- Pielke, R. A., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Porter, K., et al. (2011). Overview of the ARkStorm scenario. U.S. Geological Survey.
- Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
- Runnalls, K.E. and T.R. Oke, 2006: Technique to detect microclimate inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *Journal of Climate*, 19, 959–978. <https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1>
- Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/wildfires>
- Seneviratne, S. et al. (2021) “Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.” In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. KQED. <https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires>
- Stephens, Scott et al., (2021) “Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win,” *Environmental Research Communications* 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2>.
- Tyukavina Alexandra , Peter Potapov, Matthew Hansen et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, *Frontiers in Remote Sensing*. Volume 3 <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.825190/full>
- U.S. Forest Service. (2022). Managing fire. <https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire>
- USGCRP. (2023). USGCRP indicators platform: Heat waves. <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>
- Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) “Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density,” *Journal of Climate* 24, no. 6 (2011): 1736–1746, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>.
- Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, “U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios,” *Monthly Weather Review* 140, no. 1 (January 2012): 44–65, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1>.
- Web Archive. (n.d.). Archive of NIFC fire data. https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html
- Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, et al. (2024). Urban development pattern’s influence on extreme rainfall occurrences. *Nature Communications*, 15, 3997. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5>
- Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, 384–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

Fejezet-összefoglaló

1900 óta az átlagos tengerszint globálisan körülbelül 8 hüvelykkel (kb. 20 cm-rel) emelkedett. Az Egyesült Államok partjai mentén a tengerszintváltozás rendkívül változó: összefüggésben áll a süllyedésre vezető folyamatok helyi változásaival, valamint az óceáni áramlási mintázatokkal. Az Egyesült Államok partjainál a legnagyobb mértékű tengerszint-emelkedés Galveston, New Orleans és a Chesapeake-öböl régióiban figyelhető meg – e helyek mindegyikén jelentős helyi szárazföldi süllyedés (süppedés) tapasztalható, ami az éghajlatváltozással nincs összefüggésben.

A globális tengerszint-emelkedés szélsőséges előrejelzései egy valószínűtlen, szélsőséges kibocsátási forgatókönyvből, valamint egy jégtakaró-instabilitást feltételező folyamat félreértéséből erednek. Az AR6 2050-re vonatkozó előrejelzéseinek értékelése idején (az 1995-2014 közötti időszakra vonatkoztatva) 2025-re az időszak közel fele eltelt, a tengerszint pedig az előre jelzettől lassabb ütemben emelkedik. Az Egyesült Államok mareográfjainak (partmenti tengerszint-mérőinek) mérési adatai nem mutatnak a tengerszint-emelkedés történelmi üteménél nagyobb gyorsulást.

7.1 Globális tengerszint-emelkedés

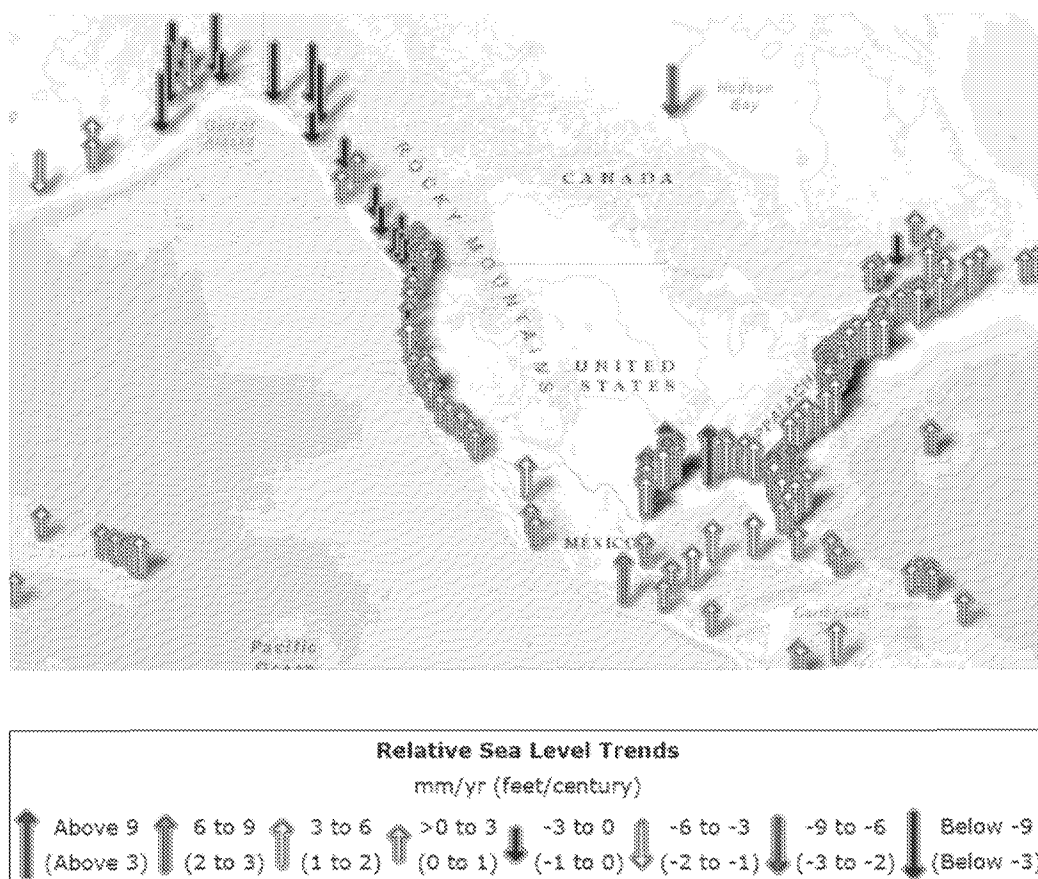
A globális tengerszint-emelkedés vitathatatlanul a legfontosabb éghajlati hatásmechanizmus, amely egyértelműen összefügg a hőmérséklet emelkedésével. Globális szinten a felmelegedés a tengervíz hőtágulása, valamint a gleccserek és jégtakarók olvadása révén emeli a tengerszintet. A szárazföldi víztárolás változásai egy másik fontos tényezőt jelentenek. Regionális szinten a tengerszint változását a nagymértékű óceáni cirkulációs mintázatok, valamint a jég és a víz újraeloszlásából eredő geológiai folyamatok és deformációk befolyásolják. Lokálisan a geológiai folyamatokból, a talajvíz-kivonásból és a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséből eredő függőleges szárazföldi mozgás is fontos.

Az AR6 becslése szerint a globális átlagos tengerszint 1901 és 2018 között 7,9 (5,9–9,8) hüvelykkel emelkedett, és a tengerszint-emelkedés üteme az elmúlt évtizedekben gyorsult. Az óceáni medence szintjén az 1993–2018 közötti időszakban a tengerszint a Csendes-óceán nyugati részén emelkedett a leggyorsabban, a Csendes-óceán keleti részén pedig a leglassabban (Fox-Kemper et al., 2021). A globális tengerszint-emelkedés ütemét évi 0,12 hüvelykre becsülik, ami körülbelül két egymásra rakott egypenny-s érme magasságának felel meg (NASA, 2020).

A globális tengerszint-emelkedés megfigyelőrendszerei jelentősen fejlődtek a műholdas korszakban, különösen a műholdas magasságmérők 1993-as megjelenésével. A helyi partmenti tengerszintmérők (mareográfok) hasznos adatokat szolgáltatnak az elmúlt évszázadra, sőt néhány helyszín esetében még hosszabb időre visszamenően is. A Kis Jégkorszak tizenkilencedik század közepi végetérését követően a tengerszintmérők azt mutatják, hogy a globális átlagos tengerszint az 1820–1860 közötti időszakban kezdett emelkedni, jóval a antropogén üvegházgáz-kibocsátás meglódulása előtt.

7.2 Az USA tengerszint-emelkedése

A globális átlagos tengerszint-emelkedés megfigyelt és előrejelzett ütemének helyi folyamatok miatt bizonyos helyszíneken kevés klímatudományi jelentősége lehet (NOAA, 2025). A 7.1. ábra azt mutatja, hogy Kanadában és Alaszkában (valamint Washington északi részén) a tengerszint a glaciális felpattanásból eredő emelkedés miatt csökken. A csendes-óceáni partvidék tengerszint-mérőinek többsége alacsony tengerszint-emelkedési ütemet mutat, míg az Egyesült Államokban a legnagyobb értékek a Mexikói-öböl partján (Louisiana és Texas), valamint az Atlanti-óceán középső részén fekvő államokban (a Chesapeake-öböl régiójában) figyelhetők meg.



7.1. ábra: Az Egyesült Államok partvidékének relatív tengerszint-emelkedési ütemét ábrázoló térkép (NOAA, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>). Referenciaként 3 mm = 0,12 hüvelyk.

A mareográfok által mért relatív tengerszint-emelkedés összemosza a tengervíz térfogatának éghajlati szempontból releváns növekedését a lokális függőleges szárazföldi mozgással. Ez utóbbit, amely helyenként változik, a legjobban egy, a mareográf közelében elhelyezett GPS-állomással lehet mérni. A szárazföldi mozgást számos folyamat vezérli, és hatásuk összehasonlíthatók az éghajlati jellel, és lokálisan súlyosbíthatják (süllyedés/süppedés esetén) vagy enyhíthetik (emelkedés esetén) a tengerszint-emelkedés kockázatát (Wöppelmann és Marcos, 2016). A süllyedést kiváltó emberi tevékenységek gyakran jelentősek. Ilyen például a talajvíz elvezetése (pl. városfejlesztés céljából) és a talajvíz vagy a szénhidrogén felszín alóli kitermelése.

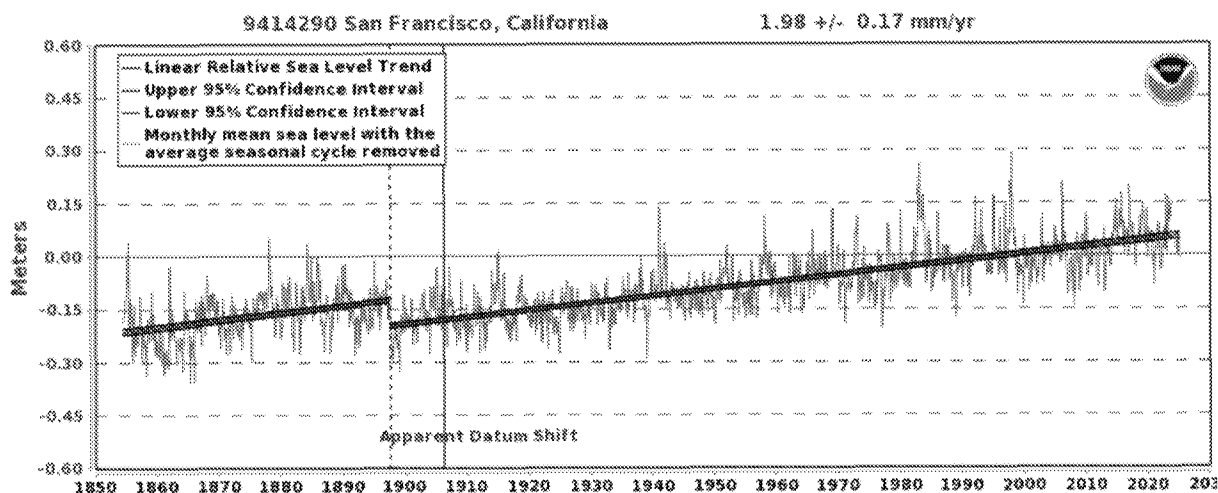
A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést (ASLR) mutatja olyan kiválasztott helyszíneken, amelyeket a korrigálatlan relatív tengerszint-emelkedés (RSLR) összegéből - mareográf idősorokból (NOAA, 2025) és a függőleges szárazföldi mozgás (VLM) méréseiből (NAS, 2012; Letetrel et al., 2015; Karegar et al., 2016) becsülve. – határoztak meg. Ezen helyszínek mindegyikén az abszolút tengerszint-emelkedés a helyi süllyedés miatt lényegesen kisebb, mint a mért relatív tengerszint-emelkedés. A mért relatív tengerszint-emelkedés több mint fele e helyszíneken a szárazföld süllyedésének tulajdonítható: San Francisco, Galveston, Grand Isle. Összehasonlításképpen, az abszolút tengerszint-emelkedés globális átlagos mértéke becslések szerint 0,12 hüvelyk/év.

Location	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, CA	+0.08	-0.06	+0.02
Galveston, TX	+0.26	-0.19	+0.07
Grand Isle, LA	+0.36	-0.28	+0.08
St Petersburg, FL	+0.12	-0.02	+0.10
New York City, NY	+0.11	-0.05	+0.06

7.1. táblázat: Abszolút tengerszint-emelkedés (hüvelyk/év, ASLR), amely a relatív tengerszint-emelkedésből (RSLR) és a függőleges szárazföldi mozgásból (VLM) tevődik össze.

San Francisco-öböl

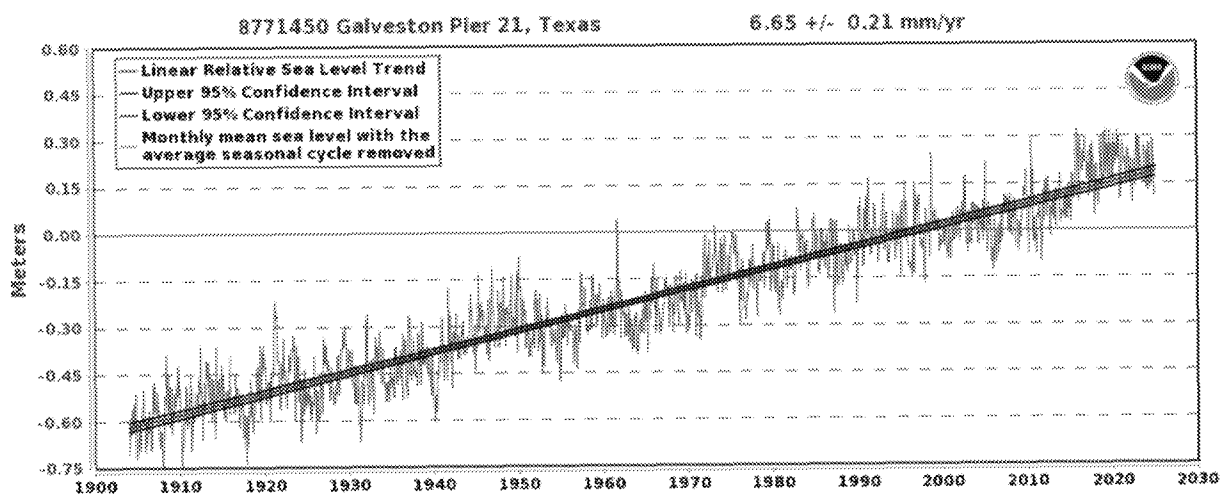
A legutóbbi évszázad során a San Francisco-öböl térségében a relatív tengerszint 7,8 hüvelykkel emelkedett, átlagosan 0,08 hüvelyk/év sebességgel (7.2. ábra). Amint a 7.1. táblázat mutatja, San Francisco függőleges szárazföldi mozgása -0,06 hüvelyk/év (süllyedés), ami a közelmúltbeli abszolút sebességet +0,02 hüvelyk/évnek adja ki. A Treasure Island, a San Francisco-i Nemzetközi Repülőtér és Foster City egyes részei akár 0,4 hüvelyk/év sebességgel is süllyednek (Shirzaei és Bürgmann, 2018). A San Francisco-öböl térségében felmerülő problémákat, beleértve a repülőteret fenyegető veszélyeket is, elsősorban a korábban vizes élőhelyekként szolgáló hulladéklerakó övezetekben fellépő talajtömörödés okozza, nem pedig a globális tengerszint-emelkedés lassú kúszása.



7.2. ábra: Mareográf-mérések San Franciscóban, Kaliforniában, a NOAA-tól neszerelve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (letöltve: 2025.04.22.).

Galveston - Houston

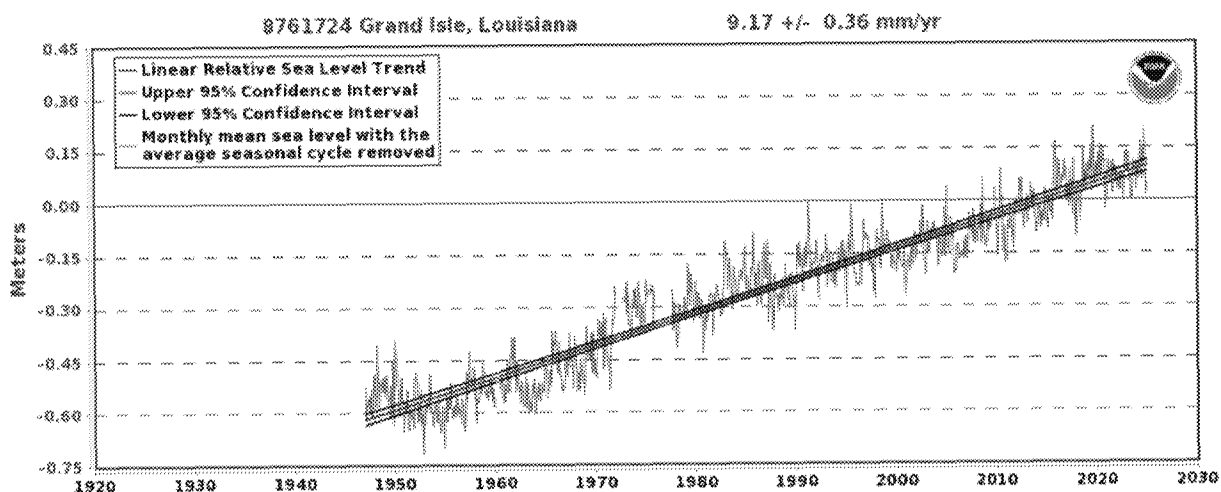
A Galveston 21-es mólónál végzett hosszú távú partmeni tengerszint-mérések (mareográf-mérések) az elmúlt évszázadban 2,18 láb tengerszint-emelkedést mutatnak, ami 0,26 hüvelyk/év sebességet jelent (7.3. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) Galvestonban -0,19 hüvelyk/évre becsülhető, ami az abszolút emelkedési sebességére +0,07 hüvelyk/év értéket ad ki (7.1. táblázat). Az Egyesült Államok Földtani Szolgálat (USGS) megállapította, hogy a Houston-Galveston régióban a szárazföldi süllyedés nagy része a talajvíz-kivonás közvetlen következménye (Kasmarek és Ramage 2017), ami a víztartó réteg üledékeinek tömörödését okozta, főként a finomszemcsés iszap- és agyagrétegekben. 1979-re Houstonban csaknem 10 lábnyi süllyedés következett be.



7.3. ábra: Mareográf-mérések a Galveston Pier-nél, Texasban, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (letöltve: 2025.04.22.).

New Orleans és a Mississippi-delta

A louisianai Grand Isle-ben végzett hosszú távú mareográf-mérések azt mutatják, hogy a tengerszint az elmúlt 100 évben valamivel több, mint 3 lábbal emelkedett, átlagosan 0,36 hüvelyk/év sebességgel (7.4. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) becslések szerint -0,28 hüvelyk/év. A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést +0,08 hüvelyk/évnek adja meg.

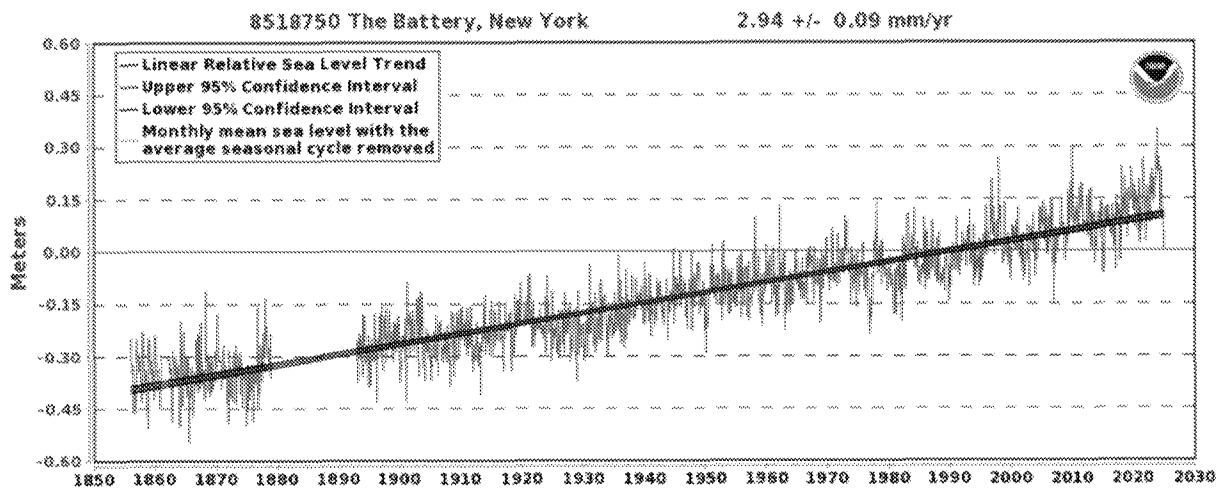


7.4. ábra: Mareográf-mérések Grand Isle-ben, Louisianában, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (letöltve: 2025.04.22.).

A Mississippi-delta régióban a tengerszint emelkedésének és a földvesztésnek a problémái összetettek. A fő okok: geológiai süllyedés és a Mississippi folyó által szállított üledék mennyiségének csökkenése. Az 1950-es évek óta a medencében épült gátak körülbelül 50 százalékkal csökkentették a Mississippi lebegő üledékterhelését (Maloney 2018). Louisiana partvidékének új süllyedési térképe szerint a part menti régió évente körülbelül 30 centiméterrel süllyed (Neinhuis et al. 2017), ami a talajvíz és az erőforrások kimerülésével jár. Mivel a város átlagos tengerszint feletti magassága 30-60 centiméterrel a tengerszint *alatt* van, az antropogén felmelegedésből eredő tengerszint-emelkedés aligha tekinthető a New Orleans-i problémák fő okának.

New York City

New York City különösen ki van téve a tengerszint-emelkedés hatásainak, mivel elsősorban szigeteken épült, és 830 kilométer hosszú partvonallal rendelkezik. Manhattan déli csücskében (The Battery) végzett mareográf-mérések azt mutatják, hogy a relatív tengerszint az elmúlt évszázadban több mint 28 cm-rel emelkedett, átlagosan 0,38 cm/év sebességgel (7.5. ábra). New York City területén azonban a függőleges szárazföldi mozgás -0,05 cm/év (nagyjából 12 cm/év), így a tengerszint abszolút emelkedésének mértéke a The Battery-nél 0,06 cm/év, ami a mért relatív tengerszint-emelkedés körülbelül 55 százaléka.



7.5. ábra: Mareográf-mérések The Battery-nél, New York államban; az adatok a NOAA-tól származnak - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (letöltve: 2025.04.22.).

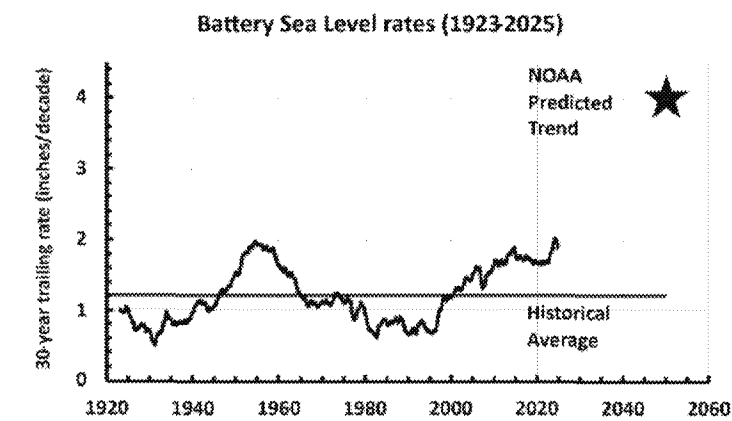
7.3 A várható tengerszint-emelkedés

A tengerszint-emelkedéssel kapcsolatos aggodalom nem az 1900 óta bekövetkezett nagyjából 20 centiméteres globális emelkedés miatt van. Hanem inkább a 21. századon át tartó melegedő éghajlat szimulációin alapuló gyorsuló emelkedésre vonatkozó előrejelzések miatt.

Az AR6 *nagyfokú egyezést* talált a 2050-re vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között, amelyek a kibocsátási forgatókönyvekre mindannyian alig érzékenyek. Csak azokat az előrejelzéseket figyelembe véve, amelyek a jégtakaró folyamatait is figyelembe veszik, és amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* van, a 2050-re vonatkozó globális tengerszint-előrejelzés az összes kibocsátási forgatókönyv szerint 3,94 és 49,9 cm közé esik (5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az 1995–2014-es alapidőszakhoz képest (Fox-Kemper et al., 2021).

Ezzel szemben az AR6 kijelenti, hogy a 2100-ra vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között *kiemértékű az egyezés*, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében. Ha csak azokat a jégtakaró-folyamatokat reprezentáló előrejelzéseket vesszük figyelembe, amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* áll fenn, az AR6 globális átlagos tengerszint-előrejelzése 2100-ra 7,9 és 39,4 hüvelyk között van (az 5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az SSP2–4,5 közepes kibocsátási forgatókönyv szerint (Fox-Kemper et al., 2021). A 2100-ig előretekintő tengerszint-emelkedésre vonatkozó előrejelzéseket nagy bizonytalanság övezi a jégtakaró instabilitásának bizonytalansága miatt, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében.

2022 februárjában a NOAA közzétette az Egyesült Államok különféle partmenti helyeire vonatkozó tengerszint-emelkedési előrejelzéseit (Sweet et al., 2022). Azt állítják, hogy 2050-re a tengerszint 30 centiméterrel fog emelkedni a manhattani The Battery-nél (2020-hoz képest). Egy 30 centiméteres emelkedés harminc év alatt több mint kétszerese lenne a jelenlegi ütemnek, és körülbelül háromszorosa az elmúlt évszázad átlagos ütemének. Ebben a történelmi kontextusban a NOAA előrejelzése figyelemre méltó – ahogy a 7.6. ábra mutatja, drámai gyorsulást igényelne, amely a 20. század eleje óta megfigyelt összes ütemtrendet meghaladja. De még ennél is figyelemreméltóbb, hogy Sweet et al. (2022) szerint ez az emelkedés „kész tény – a jövőbeli kibocsátásoktól függetlenül meg fog történni. Egy évtized múlva kiderül, hogy ennek az előrejelzésnek van-e alapja.



7.6. ábra: A tengerszint-emelkedés üteme a manhattani The Battery-nél. Az ábrán a harmincéves történelmi trend látható, valamint a NOAA által állítólágosan „kész tény”, a 2050-ig jelzett trend. Történelmi adatok: NOAA Tides and Current.

Hivatkozások

- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>
- Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers, Houston-Galveston Region, Texas (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20175080>

- Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. *Continental Shelf Research*, 111(Part A), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018>
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelecz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001>
- National Academy of Science (NAS, 2012). Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington>
- NASA. (2020). NASA sea level rise portal: 2020 edition. <https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). Sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- NOAA Tides & Currents. (n.d.). Relative sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 27(6), 28–29. <https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1>
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234>
- Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). Global and regional sea level rise scenarios for the United States (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

Fejezet-összefoglaló

Az attribúció (egy ok hozzárendelése valamely jelenséghez, „oktulatdonítás”) az éghajlatváltozás valamely megnyilvánulása okának, mindenekelőtt az antropogén tevékenységnek a beazonosítására utal. Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos vita zajlik, különösen a szélsőséges időjárási események vonatkozásában. Az okok beazonosítását megnehezíti a nagy természetes változékonyság, a várható antropogén jel viszonylag kis értéke, a jó minőségű adatok hiánya és a hiányos éghajlati modellekre való támaszkodás. Az IPCC régóta figyelmeztet arra, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló módszerek eredendően bizonytalanok, és az oktulatdonítás végső soron a szakértői megítéléstől függ.

Az IPCC a CO₂ közelmúltbeli felmelegedésben betöltött szerepéről szóló főbb értékeléseinek lényegi kritikája a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelését, a napenergia-változékonyság és az aeroszol-kényszer mérési bizonytalanságait, valamint az attribúcióhoz használt statisztikai módszerek problémáit teszi szóvá.

A szélsőséges eseményekhez kapcsolódó legtöbb éghajlati hatást kiváltó tényezőkkel kapcsolatosan az IPCC nem tesz attribúciós (oktulatdonítási) állításokat. A globális szélsőségek statisztikáival kapcsolatos állítások (pl. események valószínűsége vagy visszatérési ideje, nagysága és gyakorisága) az adatok korlátozott volta miatt általában nem tekinthetők pontosnak, és ezeket gyenge megbízhatósággal szerepeltetik. Az egyes szélsőséges időjárási események attribúciója (oktulatdonítása) az esemény ritkasága miatt ébreszt kételyt. A 2021-es északnyugat-amerikai hőhullám okaival kapcsolatos ellentmondásos állítások jól mutatják az egyes szélsőséges eseményekkel kapcsolatos elhamarkodott oktulatdonítási állítások buktatóit.

8.1 Bevezetés

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) különbséget tesz az éghajlatváltozás észlelése és az éghajlatváltozás attribúciója (okának hozzárendelése, oktulatdonítása) között. Az AR6 WGI szöveget (IPCC, 2025) meghatározása szerint:

Észlelés: A változás észlelése az a folyamat, amelynek során kimutatjuk, hogy az éghajlat vagy az éghajlat által érintett rendszer valamilyen meghatározott statisztikai értelemben megváltozott, anélkül, hogy megadnánk a változás okát. Egy beazonosított változás akkor mutatkozik meg a megfigyelésekben, ha a véletlenszerű, pusztán a belső változékonyság miatti bekövetkezés valószínűsége kicsin, például <10%.

Attribúció: Az attribúció az a folyamat, amelynek során több ok-okozati tényező relatív hozzájárulását hozzárendeljük valamely változáshoz vagy eseményhez, a megbízhatóság formális értékelésével.

Mind az észlelés, mind az attribúció statisztikai elemzésre támaszkodik. Az észlelés arra összpontosít, hogy a változások elég jelentősek-e ahhoz, hogy az októl függetlenül kiemelkedjenek a véletlenszerű változásokból. Az attribúció a megfigyelt események összehasonlítását jelenti a modell által generált ellentmondásos esetekkel. Mivel éghajlati kísérleteket nem lehetséges végezni, az attribúció statisztikai következtetést igényel annak felmérésére, hogy az emberi tevékenység (például az üvegházgáz-kibocsátás) és a természetes tényezők (például a vulkánkitörések) mennyire járulnak hozzá a megfigyelt változásokhoz. Az attribúciós módszerek feltételezik, hogy a rendszer összes külső és belső mozgatórugója ismert és jelen van.

Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos viták zajlanak, különösen azokról, amelyek szélsőséges időjárási eseményeket tulajdonítanak az éghajlatváltozásnak. Az IPCC régóta figyelmeztet, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló

módszerek eleve bizonytalanok, és a döntés végső soron a szakértői megítéléstől függ. Az AR4 I. munkacsoport (Hegerl et al., 2007) a következőképpen magyarázta ezt:

Az éghajlatváltozás okainak „hozzárendelése” az a folyamat, amelynek során meghatározott megbízhatósági szinttel megállapítjuk a kimutatott változás legvalószínűbb okait... az egyértelmű attribúcióhoz (hozzárendeléshez) az éghajlati rendszerrel ellenőrzött kísérletek elvégzésére lenne szükség. Mivel ez nem lehetséges, a gyakorlatban az antropogén klímaváltozási oktatáson (attribúció) alatt azt értjük, hogy egy észlelt változás „összhangban van az antropogén és természetes kényszerítő tényezők adott kombinációjára adott becsült válaszokkal”, és „nem egyeztethető össze a közelmúltbeli klímaváltozás alternatív, fizikailag hihető magyarázataival, amelyek kizárják az adott kényszerítő tényezők kombinációjának fontos elemeit” (IPCC, 2001)... A fent leírt, észlelési és attribúciós kutatásokban alkalmazott megközelítések nem tudják teljes mértékben figyelembe venni az összes bizonytalanságot, ezért végső soron szakértői megítélésre van szükség ahhoz, hogy hiteles értékelést legyen adható arról, hogy egy adott ok felelős-e egy adott klímaváltozásért.

Az AR5 II. Munkacsoport (Cramer et al., 2014) a következőt nyilatkozza:

A klímaváltozás hatásainak észlelésével (a detektálással) és hozzárendelésével (az attribúcióval) kapcsolatos két fő kihívás a megfigyelésekhez és a folyamatok megértéséhez kapcsolódik. A megfigyelési oldalon ritkák a természeti és emberi rendszerekkel, valamint az azokat befolyásoló többszörös tényezőkkel kapcsolatos kiváló minőségű, hosszú távú adatok. Ezenkívül a klímaváltozás hatásainak detektálása és hozzárendelése megköveteli azoknak a folyamatoknak a megértését, amelyek révén a klímaváltozás más tényezőkkel együtt befolyásolhatja a szóban forgó rendszert.

Az éghajlati rendszerben az ok-okozati láncok összetettsége miatt ezen kapcsolatok vizsgálata rendkívül nagy kihívást jelent.

8.2 Oktatáson módszerek

A megfigyelt éghajlatváltozások okainak kiértékelésére az IPCC számos attribúciós (oktatáson) módszert alkalmaz, hogy elkülönítsék a természetes és az ember által okozott tényezőket. Az alábbiakban a legfontosabb IPCC attribúciós módszerek tömör leírását találjuk.

Az optimális ujjlenyomat-elemzés a megfigyelt éghajlati adatok változásainak magyarázatára lineáris regressziót használ, antropogén kényszerítő tényezők figyelembe vételével és azok nélkül futtatott éghajlati modell-szimulációk súlyozott összegeként. A regressziós modellben használt adatokat súlyozzák, hogy megpróbálják minimalizálni a véletlenszerű zaj hatását, és a becslési módszert úgy választják meg, hogy figyelembe vegye az éghajlati modell hibáját.

Az idősoros elemzés az antropogén kényszerítő tényezők és a természetes változékonyság közötti statisztikai különbségeket használja ki annak megállapítására, hogy melyik dominál a megfigyelt hőmérsékletekben, és a változások időzítésének változásait is felhasználja annak meghatározására, hogy kikövetkeztethető-e az ok-okozati összefüggés az adatsorok között.

A folyamat-alapú attribúció a megfigyelt változások mögött meghúzódó fizikai mechanizmusok megértésére összpontosít. Ez a megközelítés ötvözi a megfigyeléseket, az éghajlati modelleket és az elméleti ismereteket, hogy a specifikus folyamatok változásait a kényszerítő tényezőknek lehessen tulajdonítani. Ezt a megközelítést gyakran alkalmazzák regionális éghajlati jelenségek, például monszunváltozások vagy sarkvidéki amplifikáció esetén.

A szélsőséges eseményhozzárendelés az emberi befolyás szerepét vizsgálja a szélsőséges időjárási események (pl. hőhullámok vagy aszályok) előfordulásának valószínűségében vagy intenzitásában. A módszerek a következők:

- A valószínűségi eseményhozzárendelés az éghajlati modell szimulációk nagy együtteseit használja a megfigyelt események és a modell által generált ellentmondások (kontrafaktuális) esetek összehasonlítására.
- A történetalapú megközelítés az eseményeket előidéző fizikai folyamatokat vizsgálja, és értékeli ki, hogy az antropogén kényszerítő tényezők hogyan módosíthatták ezeket a folyamatokat.

8.3 A globális felmelegedés okutajdonítása

A három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben a globális felmelegedéssel kapcsolatos okutajdonítási (attribúciós, hozzárendelési) állítások a következők:

AR4: A 20. század közepe óta megfigyelt globális átlaghőmérséklet-**növekedés legnagyobb része** valószínűleg az antropogén üvegházhatású gázok koncentrációjának megfigyelt növekedésének köszönhető (IPCC 2007).

AR5: *Rendkívül valószínű*, hogy a globális átlagszín-hőmérséklet 1951 és 2010 között **megfigyelt emelkedésének több mint felét** az üvegházgáz-koncentráció antropogén eredetű növekedése és egyéb antropogén tényezők együttesen okozták. Az ember okozta felmelegedéshez való hozzájárulás legjobb becslése hasonló mértékű, mint az ugyanebben az időszakban megfigyelt felmelegedés. (IPCC 2013)

AR6: Az ember okozta globális felszíni hőmérséklet-emelkedés valószínűsíthető tartománya 1850–1900 és 2010–2019 között 0,8°C és 1,3°C között van, a legjobb becslés 1,07°C. Valószínű, hogy a jól kevert üvegházhatású gázok 1,0°C és 2,0°C közötti felmelegedést, egyéb emberi tényezők (főként aeroszolok) 0,0°C és 0,8°C közötti lehűlést okoztak, a természetes tényezők pedig –0,1°C és +0,1°C közötti mértékben változtatták a globális felszín-hőmérsékletet, míg a belső változékonyság –0,2°C és +0,2°C közötti mértékben változtatott. Nagyon valószínű, hogy 1979 óta a troposzféria-felmelegedés fő mozgatórugói a jól kevert üvegházhatású gázok (IPCC 2021).

Az AR4 és AR5 attribúciós nyilatkozatok a 20. század közepe óta tartó felmelegedésre utalnak, arra az időszakra, amikor az üvegházgáz-kibocsátásban gyors növekedés kezdődött. A „legtöbb” és a „több mint a fele” szavak szándékosan pontatlanok, a felmelegedés 51 és 99 százaléka között mozoghatnak. E pontatlanság feltehetően a strukturális bizonytalanságok, például a természetes belső változékonyság figyelembevételét szolgálja. A megbízhatósági szint az AR4-től az AR5-re *nagyon valószínűről rendkívül valószínűre* nő. Az AR6-ban szereplő attribúciós állítás szerkezete alapvetően eltérő, a felmelegedést az 1850–1900 közötti időszakra vonatkoztatják. Az AR6 attribúciós állítása számszerűen pontosabb, bár a „valószínű” egy alacsonyabb megbízhatósági szintet jelent – az AR6 a felmelegedést lényegében teljes egészében az üvegházgáz-koncentráció emelkedésének tulajdonítja. Az AR6 leginkább magabiztos állítása az 1979 óta bekövetkezett troposzférikus felmelegedéssel kapcsolatos, a „fő mozgatórugó” és a „nagyon valószínű” szavak használatával.

Az IPCC a jelenkori felmelegedés okainak értékelésével kapcsolatban három területen kkap érdemi kritikát: a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelése, nem megfelelő statisztikai módszerek, valamint a modellek és a megfigyelések közötti jelentős eltérések. Az utóbbit az 5. fejezet tárgyalja, míg ez a fejezet az első két tényezőt veszi számba. Mindezek a kritikák a jelenkori felmelegedés IPCC-attribúciójára vonatkoznak, amelyben az IPCC még a szélsőséges események attribúcióját is alátámasztotta.

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

Az AR6 kijelenti, hogy az 1850-1900 közötti természetes külső tényezők a globális felszíni hőmérsékletet $-0,1^{\circ}\text{C}$ és $+0,1^{\circ}\text{C}$ - közötti értékekben változtatták, a belső változékonyság pedig $-0,2^{\circ}\text{C}$ - és $+0,2^{\circ}\text{C}$ közötti értékekben – átlagosan lényegében nem voltak semmilyen nettó hatással az 1850-1900 közötti felmelegedésre. Amint azt alább tárgyaljuk, a természetes változékonyság ezen minimális hozzájárulását számos publikáció vitatja, megkérdőjelezve a napenergia-változékonyság és a nagyléptékű óceáni cirkulációkból eredő belső változékonyság elhanyagolhatóságát

Napsugárzás-változékonyság

Az AR5 arra a következtetésre jutott, hogy az 1750–2011 közötti időszakban a teljes napsugárzás (TSI) változásai miatti sugárzási kényszer a legjobb becslés szerint nagyon csekély volt ($0,05 \text{ W/m}^2$, Myrhe et al., 2014). Az AR6 az elmúlt évszázadokra lényegesen magasabb értékeket és a TSI változás-becslésre sokkal szélesebb tartományt ismer el, kijelentve, hogy a TSI a Maunder-minimum (1645–1715) és a huszadik század második fele között $0,7\text{--}2,7 \text{ W/m}^2$ -rel nőtt, ez a tartomány magában foglalja mind az alacsony, mind a magas változékonyságú TSI adatkészleteket (Gulev, 2021). Az AR6-ban attribúciós vizsgálatokhoz használt CMIP6 klímamodell-szimulációkhoz ajánlott kényszerítő adatkészlet azonban két alacsony napsugárzási változékonyságú adatkészlet átlagát veszi alapul (Matthes, 2017).

Bár az AR6 lényegesen nagyobb napsugárzási hatást mutat, mint az AR5, a napsugárzás éghajlatra gyakorolt teljes hatását az antropogén kényszerhez képest továbbra is csekélynek értékelték. A napváltozások éghajlatra gyakorolt hatása azonban bizonytalan, és ma is jelentős vita tárgyát képezi (Lockwood, 2012; Connolly et al., 2021) – ami az IPCC értékelő jelentéseiben nem derül ki.

A TSI időbeli változása továbbra is kihívást jelent. 1978 óta műholdak mérik közvetlenül a TSI-t. Az adatok azonban nem elhanyagolható ellentmondásokról tanúskodnak, úgyhogy a TSI több évtizedes trendjeinek értelmezéséhez időben átfedő műhold-megfigyelések et kell egymással összehasonlítani. Számos egymással versengő összetett TSI adatkészlet létezik, amelyek között eltérés van abban, hogy az 1986–96 közötti időszakban a TSI nőtt-e vagy csökkent az (ez az ún. az ACRIM-hézag; lásd a 4. fejezetet). Továbbá a TSI műholdas adatait olyan proxy modellek kalibrálására használják, amelyek a napfoltokból és a kozmogén izotópmérésekből következtetnek a múltbeli napváltozásokra (Velasco Herrera et al., 2015).

Jelentős bizonyítékok vannak arra, hogy a 20. század második felében (1959-tel kezdődően) erős naptevékenység volt megfigyelhető, amely az 1990-es évekig terjedt, mielőtt a 21. század elején hanyatlás következett volna be; ezt az időszakot gyakran nevezik „modern maximumnak” (Chatzistergos et al., 2023; Solanki et al., 2004; Usoskin et al., 2007). Egyes kutatók azonban arra a következtetésre jutottak, hogy nem lehet teljes bizonyossággal kijelenteni, hogy a TSI több évtizedes trendje is változhat (Schmutz, 2021).

E bizonytalanság azt eredményezi, hogy a TSI egyes 1750-től kezdődő rekonstrukciói alacsony változékonyságot mutatnak (ami a napváltozások nagyon alacsony hatását sugallja a globális felszíni átlaghőmérsékletre), míg a magas TSI-változékonyságú adatsorok az iparosodás előtti idők óta a hőmérséklet-változások több mint 70 százalékát megmagyarázhatják (Scafetta, 2013; Stefani, 2021). Az elemzésben használt TSI műholdfelvételek megválasztása ezért jelentősen befolyásolhatja, hogy az éghajlatváltozást mennyiben tulajdonítják az emberi, illetve a természetes kényszereknek. Egyre több bizonyíték van arra, hogy a napsugárzás változékonyságának egyéb vonatkozásai, amelyeket közvetett napenergia hatásoknak neveznek, vagy felerősítik a TSI-kényszert, vagy a TSI-kényszertől függetlenek. Scafetta et al. (2023) szerint a napenergia éghajlatra gyakorolt hatásának ~80 százaléka nem TSI-mechanizmusokból eredhet. Számos lehetséges folyamat létezik, beleértve a Nap ultraibolya-változásait; az nagyenergiájú részecskék kicsapódását; a lélegektromos tér hatását a felhőzetre; a Nap által modulált galaktikus kozmikus sugárzás által előidézett felhőzetváltozásokat; a mágneses tér nagy relatív változásait; és a napszél erősségét. Effajta közvetett naphatásokat az éghajlati modellek nem tartalmaznak, bár a hatásuk becslésére szolgáló közvetett módszerek azt sugallják, hogy jelentősek. Az

éghajlatot befolyásoló nem TSI-mechanizmusokra vonatkozó állítások azonban bizonytalanok és vitatottak.

A nagyléptékű óceáni cirkulációk természetes változékonysága

A globális felszínhőmérséklet átlagos változásai összefüggnek az óceáni cirkulációs minták visszatérő nagyléptékű váltoásaival, beleértve az Atlanti-óceán több évtizedes oszcillációját (AMO), a Csendes-óceán évtizedes oszcillációját (PDO), valamint az El Niño-Déli oszcillációt (ENSO). Ezek a cirkulációk befolyásolják az óceán hőfelvételét és hőeloszlását, valamint a légköri cirkulációs mintákat és a felhőeloszlást. Vita folyik arról, hogy ezek a változások szigorúan az éghajlati rendszer belső tényezői-e, vagy lehet-e nap-/csillagászati eredetű, esetleg befolyásolhatják-e nagy vulkánkitörések.

Bár az éghajlati modellek szimulálják a nagyléptékű óceáni cirkulációkat és a belső éghajlati változékonyságot, a legtöbb modell a több évtizedre visszamenő megfigyelésekhez képest túl kicsi amplitúdót mutat, és a modellnek a megfigyelt éghajlattal való együttes változása fokozatosan eltűnik (Kravtsov et al. 2024). Több szimuláció átlagolása hatékonyan átlagolja a belső változásokat, és csak a kényszerített éghajlati változékonyságot hagyja meg (pl. CO₂-kényszerítés). Mivel a jelenkori felmelegedés nagy része az 1970-es évek végén kezdődött, a mostani 50 éves felmelegedés időléptékben ugyanaz, mint az AMO és a PDO több évtizedes oszcillációi.

Az AR5 és AR6 jelentések összefoglaló megállapításai:

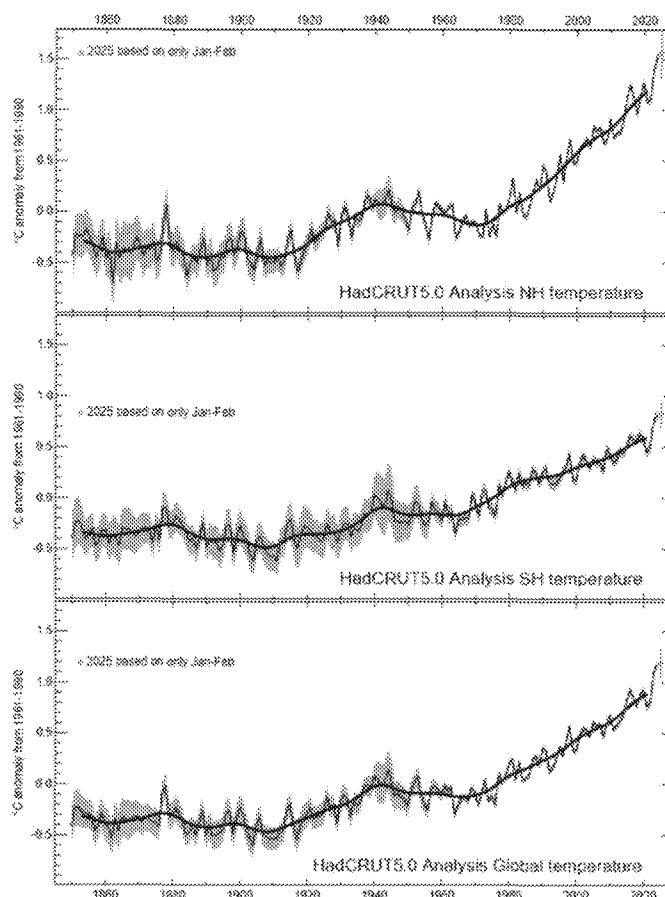
AR5: A Csendes-óceán évtizedes változékonysága, amely a PDO-hoz vagy az IPO-hoz kapcsolódik [IPO: évtizedek közötti - interdekádós - csendes-óceáni oszcilláció], jelentősen hozzájárul a regionális és globális hőmérsékleti trendekhez, de a belső változékonyság és a külső kényszer relatív hozzájárulását nehéz a CMIP5 szimulációkban szétválasztani.

AR6: Az AR5 óta egyre jobban megértjük a belső változékonyság, például az ENSO, a PDO és az AMO szerepét a regionális éghajlati trendek modulálásában. Azonban ezen módusok pontos időzítésével és amplitúdójának szimulációjával kapcsolatos CMIP6 modellkorlátok következtében (is) a megfigyelt változások antropogén kényszernek való tulajdonítása bizonytalan (*nagy megbízhatóságú megállapítás*).

A több évtizedes oszcillációk globális hőmérsékletre gyakorolt csúcspont-mélypont hatásának amplitúdóját az IPCC AR6 a következőképpen értékelte: „A belső változékonyság miatti változás valószínűsíthető tartománya -0,2°C és +0,2°C között van (IPCC, 2021).” Ez 0,4°C-os mélypont-csúcspont változást jelent. Évszázadokon keresztül globális hőmérséklet-változások folyamán a mélypontok és a csúcspontok hatása kioltódnak, és a nettó hatás csekély vagy nulla.

Az olyan oszcillációk esetében azonban, mint az AMO és a PDO, a csúcspontok és mélypontok időzítése összetéveszthető az évszázados trenddel. E kérdés az elmúlt 50 év felmelegedésének oktatájdontásában (amikor a közelmúltbeli felmelegedés nagy része bekövetkezett) nagyon fontossá válik. Még ha a klíma-modellek a több évtizedes oszcillációk helyes amplitúdójával is rendelkeznek, a csúcspontok és mélypontok időzítése nincs megfelelően szimulálva, mivel minden modell és az egyes együttesek eltérő fázisokat szimulálnak. Miután a modellgyűttes tagjainak és a különféle modelleknek a szimulációit átlagolták, a természetes belső változékonyság hozzájárulása a fáziskülönbségek miatt kiátlagolódik, ami a természetes belső változékonyság szerepét az attribúciós folyamatban gyakorlatilag kioltja.

A globális felszínhőmérséklet-anomáliák 1850 óta tartó idősorai (8.1. ábra) egy általános felmelegedést mutató trendhez hozzáadódóan jelentős amplitúdójú szabálytalan változásokat mutatnak, és 1976 után az északi és a déli félteke közötti trendben markáns különbség alakul ki. Az 1905-1945 közötti időszak erős felmelegedési tendenciát mutatott. A következő 30 évben, 1945-1976 között, enyhén csökkenő hőmérsékleteket tapasztaltak. A legutóbbi felmelegedési időszak 1977-ben kezdődött.



8.1. ábra: A globális átlagos felszínhőmérséklet-anomália 1850–2025 között. Fent: Északi félteke. Középen: Déli félteke. Alul: Globális átlag. Forrás: UK Hadley Centre
<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

A 20. század eleji felmelegedés okait Hegerl et al. (2017; 2019) tárgyalja. A légköri CO_2 -koncentráció 298 ppm-ről (1905) 310 ppm-re (1941) nőtt, ami arra utal, hogy a CO_2 -nek csekély volt a hatása. A vulkáni aktivitás ebben az időszakban nagyon alacsony szintű volt, a napenergia-kényszer pedig bizonytalan. Hegerl et al. (2017) valamilyen módon mégis arra következtetett, hogy ennek a felmelegedésnek a 40-54 százaléka külső kényszernek tulajdonítható, a többi pedig belső változékonyságnak. Bronniman et al. (2024) a 20. század első évtizedében a déli féltekén bekövetkezett lehűlés okaira összpontosított. Megállapította, hogy a lehűlés a Csendes-óceán La-Niña-szerű mintázatahoz, egy hűvös trópusi és szubtrópusi Dél-Atlanti-óceánhoz, egy hideg extratrópusi Dél-Csendes-óceánhoz és hűvös déli közepes szélességi körökön található szárazföldi területekhez kapcsolódott. A Déli Gyűrűs Módus (SAM) pozitív volt, erősödött az Amundsen-Bellingshausen-tengerek alacsony értékével, bár az adattermékek szórása jelentős.

Az 1930-as évek felmelegedése és az azt követő lehűlés a század közepén különösen hangsúlyos volt az Arktiszon. Bokuchava és Semenov (2021) megállapították, hogy ezeket a változásokat valószínűleg az Észak-Atlanti-óceán és az Észak-Csendes-óceán hosszú távú természetes éghajlati változásainak együttes hatása okozta, hozzájárulva a lecsökkent vulkáni aktivitáshoz és a naptevékenység változásaihoz kapcsolódó természetes sugárzási kényszerhez, valamint a emelkedő üvegházgáz-koncentrációhoz. Tokinaga et al. (2017) kimutatta, hogy a 20. század elején a belsőleg generált csendes-óceáni és atlanti interdekádos (évtizedek közötti) változékonyság együttes hatása fokozta az Arktisz felmelegedését. A szinkronizált csendes-óceáni-atlanti felmelegedés drasztikusan megváltoztatja a bolygóméretű cirkulációkat az északi féltekén; ugyanezek a cirkulációs minták globális hatással is bírnak.

Az 1945 és 1976 közötti lehűlési időszakot „nagy szünetnek” nevezik. Számos okot feltételeztek: a csendes-óceáni évtizedes oszcillációval és az atlanti több évtizedes oszcillációval összefüggő ingadozásokból eredő természetes belső változékonyságot; az ipari tevékenységekből származó aeroszolkibocsátás növekedése miatti lehűlést; megnövekedett hőfelvételt az Atlanti-óceánban, a Déli-óceánban és az Egyenlítői-óceánban. Thompson et al. (2010) azt állapította meg, hogy a huszadik század közepén a két félteke hőmérsékleti trendjei közötti különbség nagyrészt az északi félteke tengerfelszín-hőmérsékletének 1968 és 1972 közötti gyors, körülbelül 0,3 °C-os csökkenésének tudható be.

Az 1976-1977-es nagy csendes-óceáni éghajlatváltozás egy figyelemre méltó éghajlati esemény volt. Ezt az északi Csendes-óceán légkör-óceán rendszerének hirtelen változása jellemezte, ami kölcsönhatásba lépett a globális éghajlati mintázatokkal. Ez az eltolódás szorosan összefügg a Csendes-óceáni Évtizedes Oszcillációval (PDO), amely évtizedek leforgása alatt oszcillál a meleg és a hideg fázisok között. Az 1976-os eltolódás átmenetet jelentett egy túlnyomórészt negatív (hideg) PDO fázisból (1947–1976) egy pozitív (meleg) fázisba (1977-től 2000-ig), jelentős következményekkel járva a globális és regionális éghajlati mintázatokra, beleértve az El Niño és a La Niña események gyakoriságát is. A Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást (GPCS) egybeesett a felgyorsult globális felmelegedés időszakának kezdetével. Ha a Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást figyelembe vesszük az 1950 óta végzett éghajlati attribúciós elemzésekben, a 20. század második felében bekövetkezett felmelegedés 40 százalékat vagy annál többet a természetes belső változékonyságnak tulajdonítanak (McLean et al., 2009; Tung és Zhou, 2013; Chylek et al., 2016; Scafetta, 2021).

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

Az optimális ujjenyomatvétel egy Allen és Tett (1999) által bevezetett statisztikai technika, amelyben a megfigyelt éghajlati adatokat éghajlati modell szimulációkkal hasonlítják össze abból a célból, hogy azonosítsák az emberi vagy természetes kényszerekhez kapcsolódó mintázatokkal (vagy „ujjenyomatokkal”). A módszer magában foglalja az észlelt éghajlati változások egy vektorának – például a világ különféle pontjain mért felmelegedési ütemeknek – együttes figyelembe vételét, és súlyozott összegű „jelek” -re való bontását, hogy a különböző típusú kényszerekkel rendelkező éghajlati modellek által generált modellmegfigyelésekkel azonos eredményt kapjanak. A súlyokat a Teljes Legkisebb Négyzetek Elmélete (TLS) nevű regressziós módszerrel választják ki. Az elemzés általában csak két jelet használ, az egyiket csak antropogén kényszereket használó modellek, a másikat pedig csak természetes kényszereket használó modellek generálják. Ha a jelhez tartozó becsült súlyozási együttható szignifikánsan eltér nullától, akkor a jelet „észleltnak” nevezik. Ha közel van 1-hez, akkor a jelet generáló modellt konzisztensnek mondják a megfigyelésekkel. Ha kisebb, mint 1, akkor az adott kényszer modellje túl erős, és csökkenteni kell, illetve fordítva. Mind a megfigyelt adatokat, mind a jeleket az éghajlati rendszer véletlenszerűségeinek modell által generált becslésével súlyozzák, hogy maximális súlyt adjanak azoknak a régióknak, ahol a természetes változékonyság minimális.

Az optimális ujjenyomat-készítés az attribúciós kutatási szakirodalom elsődleges eszköze. Bár az IPCC 2001 óta széles körben használja és kiemelten kezeli, nagyon kevés szakirodalom vizsgálja az általa generált eredmények statisztikai tulajdonságait. Az egyik eredendő gyengesége az, hogy az eredmények az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezésektől függenek, különösen a természetes változékonyság ábrázolását illetően (IPCC AR5 10.2.3. fejezet).

McKitrick tanulmányorozata (McKitrick 2021, 2022, 2023, 2025) megkérdőjelezte az optimális ujjenyomat-készítési módszert, azzal érvelve, hogy az eredendően megbízhatatlan, és hogy az ökonometriából átvett gyakorlatok érvényesebb eredményeket adhatnak. A statisztikai elmélet megköveteli, hogy a regressziós modellek torzítatlan együtthatókat szolgáltatassanak, ez esetben teljesül a Gauss-Markov feltételeknek nevezett feltételezési halmaz. McKitrick (2021) azzal érvelt, hogy az Allen és Tett (1999) módszertan sérti a Gauss-Markov feltételeket, ami potenciálisan torzított és inkonzisztens ujjenyomat-együtthatókhoz vezet, aláásva a módszer megbízhatóságát. Chen et al. (2023) megerősítették ezt az elemzést, bár azzal érveltek, hogy a módszer nagyon szigorú

feltételezések mellett jó eredményeket hozhat. McKitrick (2022) és (2023) további aggodalmakat is megemlített, ugyanis a klímakutatók – a tudományos diszciplínák között gyakorlatilag egyedülként– TLS-t használtak antropogén üvegházhatású gázok jel-együtthatóinak becslésére, annak ellenére, hogy annak a tendenciája instabil, ha csak nem áll fenn néhány olyan erős feltételezés, amelyek teljesülése a gyakorlatban nagy valószínűséggel lehetetlen. Az optimális ujjlenyomatvétel során a szokásosan felmerülő körülmények között a TLS-becslések nagy pozitív torzítást hordoznak magukban. Így minden olyan tanulmány, amely optimális ujjlenyomatvételhez anélkül használt TLS-t, hogy ellenőrizte volna annak alkalmazhatóságát az adott adatkörnyezetben, valószínűleg túlbecsülte az attribúciót.

McKitrick (2025) empirikus példát mutatott be a hagyományos optimális ujjlenyomatvétel eredményeinek és a mainstream ökonometriából származó módszereknek az összehasonlításáról. Az utóbbiakról ismert, hogy specifikus alkalmazások egyikeként jeldetektálásra is alkalmasak. Míg az IPCC optimális ujjlenyomatvételi módszere egy 1900 és 2010 közötti globális hőmérsékleti adathalmazon közel 1,0-es antropogén jel-együtthatót eredményez, a konzisztens módszer körülbelül 0,4-es együtthatót eredményez, amely az 1980 és 2010 közötti adatokon körülbelül 0,65-re emelkedik, ami azt jelenti, hogy az üvegházhatású gázokra adott modellválaszt körülbelül a felére kell csökkenteni, hogy optimálisan illeszkedjen a megfigyelésekhez. Ezzel szemben a természetes kényszerítő jel együtthatója 2,0 és 4,0 között van, ami azt jelenti, hogy a természetes kényszerítő éghajlati modelleket két-négyszeresére kell felszorozni, hogy megfeleljenek a megfigyelt éghajlatváltozásnak. A McKitrick (2025) által becsült ujjlenyomat-együtthatók, amikor az adatkészletben azokat a kényszerítő jelek generálására használt klímamodellek átlagos érzékenységeinek skálázására használják, 1,4°C-os átmeneti klímaérzékenységet mutatnak. Ez az érték összhangban van Lewis (2023) becslésével, amely egy másik becslési módszert és több független adatkészletet használ.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az az alap, amiről kiindulva az optimális ujjlenyomat-módszert sokáig megbízhatónak tekintették, rossz. Annak meghatározásához, hogy mely eredmények statisztikailag robusztusak, a korábbi eredmények egyenkénti újrvizsgálatára lenne szükség.

8.3.3 Idősoros módszerek

Az IPCC (AR5 WGI 10.2.2) felfigyelt az oksági összefüggések értékelésének az idősoros ökonometria szakirodalmából felmerült alternatív megközelítéseire. Ezeknek az az előnyük, hogy nem az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezéseken alapulnak, hátrányuk viszont, hogy függenek az éghajlati és kényszerítő adatok mögött meghúzódó adatgeneráló folyamattal kapcsolatos, nehezen tesztelhető feltételezésektől. A ma klímaökonometriának nevezett módszerek olyasféle eszközöket használnak, mint egységgyök-tesztelés, Granger-okszági analízis és kointegrációs analízis. Ezeknek mindegyike ismerős a közgazdaságtanból és a pénzügyekből, és lassan alkalmazásra kerülnek a klímatudományban is. Az idősoros elemzési módszerek lehetőséget kínálnak annak meghatározására, hogy a klímaváltozás elsődleges mozgatórugói antropogén vagy természetes tényezők-e, anélkül, hogy klímamodelleket kellene használni, bár kulcsfontosságú kérdések továbbra is tisztázatlanok (pl. Dergiades et al., 2016, Balcombe et al., 2019, Dagsvik et al., 2020, Razzak, 2022, Dagsvik és Moen, 2023).

A „Granger-okszági” modellezés az együtt mozgó adatsorok befolyásolási irányainak meghatározására alkalmas eszköz. Ez egy statisztikai fogalom, nem fizikai. Ha egy változó aktuális értékének ismerete jelentősen javítja egy másik változó előrejelzésének pontosságát, ebből oksági összefüggésre következtethetünk; ezt Granger-okszági viszonyoknak nevezzük. A modellezőeszközök, az úgynevezett vektor autoregresszió, közvetlen impulzus-válasz mintázatokat és visszacsatolásokat mér. A jól ismert Vosztok jégmagadatokra történő alkalmazás hibát tárt fel Al Gore *Kellemetlen igazság* című dokumentumfilmjében. Gore bemutatta az adatokat, és felhívta a figyelmet a hőmérséklet és a CO₂ változás közötti koherenciára egy 440 000 éves időszak folyamán, amelyről Gore azt állította, hogy a hőmérséklet-változásokat a CO₂ okozza. A hőmérséklet-változások azonban befolyásolhatják a légköri CO₂-szintet. Davidson et al. (2015) megvizsgálta az idősorokat, és az derült ki, hogy a CO₂-

nek Granger-oka hőmérséklet, de fordítva ne is áll fenn. Más szóval, a Vosztok-adatokban ábrázolt időléptékekben a sorozat koherenciája elsősorban a hőmérséklet CO₂-szintre gyakorolt hatásának a következménye, nem pedig a CO₂-szint hőmérsékletre gyakorolt visszacsatolása.

Összefoglalva, az éghajlati adatok ok-okozati összefüggéseinek két elsődleges statisztikai módszerei: az optimális ujjenyomatvétel és az idősoros elemzés. Az attribúciós szakirodalomban Allen és Tett (1999) optimális ujjenyomatvételi módszerének alkalmazásai dominálnak, és ezzel alátámaszthatók voltak a korábbi IPCC-következtetések. Az eredmények azonban függenek az éghajlati modellek pontosságától, és a módszer közelmúltbeli bírálatok szerint „eredendően elfogult”. Az idősoros módszerek nem függenek az éghajlati modellektől, de saját feltételezéseket igényelnek, és olyan eredményeket generáltak, amelyek eddig egyáltalán nem konvergáltak konszenzus felé.

8.4 Csökkenő bolygóalbedő és a legutóbbi rekordmelegedés

A globális átlaghőmérséklet hirtelen emelkedése előtérbe állította az éghajlat rövid távú mozgatórugóinak kérdését. Az egyik ilyen jelölt az elnyelt napsugárzás aránya, amely az elmúlt években szintén hirtelen megnőtt. A kérdés az, hogy a változás az üvegházgázok okozta felmelegedés belső visszacsatolása-e, vagy valami más növelte az elnyelt sugárzás arányát, amely aztán a közelmúltbeli felmelegedést okozta.

A bolygóalbedő a bejövő napsugárzás azon részaránya, amely visszaverődik az űrbe, ahelyett, hogy azt a bolygó elnyelné. E tekintetben az erősen fényvisszaverő felületek: a felhők teteje, valamint a hó és a jég a legfontosabbak. A Föld albedója körülbelül 30 százalék, ami azt jelenti, hogy a Földet elérő napfény közel egyharmada közvetlenül visszaverődik az űrbe. Az alacsonyabb albedó azt jelenti, hogy a bolygó több napenergiát nyel el, amit aztán hőként sugároz vissza. Ezért, ha minden más tényező változatlan, a bolygó albedójának csökkenése a Föld felmelegedésével jár.

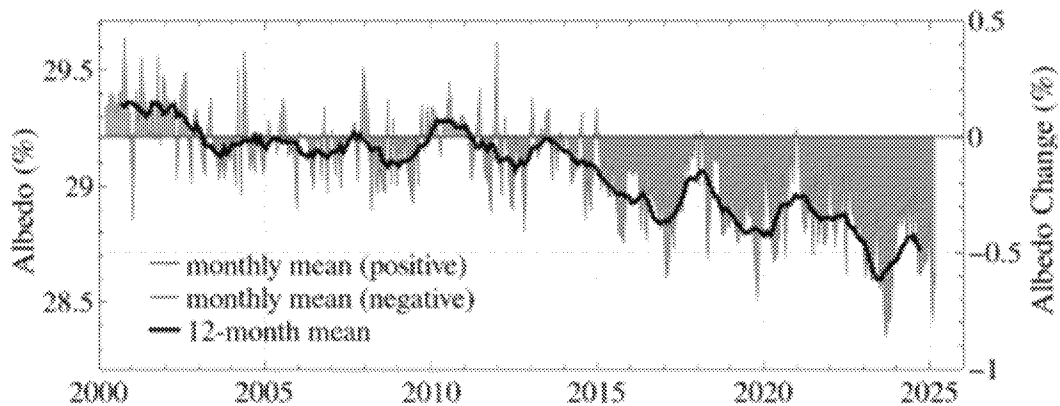
A Föld éghajlati rendszerében vitathatatlanul a legszembetűnőbb 21. század változás, hogy a bolygó albedója 2015 óta jelentősen csökkent, amely folyamat legalább két éven át egybeesett a rekordot elérő globális melegedés időszakával. A 8.2. ábra a bolygó albedójának 2000 óta bekövetkezett változásait mutatja. (Jó műholdas megfigyelések 2000 óta vannak). A bolygó albedójának 0,5 százalékos csökkenése 2015 óta az átlagosan elnyelt napsugárzásban 1,7 W/m²-es növekedésnek felel meg (Hansen és Karecha, 2025). Összehasonlításképpen, Forster et al. (2024) becslése szerint a légköri CO₂-koncentráció az iparosodás előtti időkhöz viszonyított növekedéséből adódó jelenlegi kényszerérték 2,33 W/m².

A 2000 előtti, kevésbé megfelelő adatokkal rendelkező időszakra visszatekintve Goessling et al. (2025) értékelése szerint a bolygó albedója viszonylag alacsony volt az 1940-es és 50-es évek körül, mielőtt az ipari aeroszol prekursor kibocsátásának növekedése az 1980-as évekig megnövelte volna az albedót. A legnagyobb bolygóalbedó-eltéréseket a vulkánkitörések okozta magas albedójú epizódok okozták, például az 1991-es Pinatubo-kitörés után. Bár bizonytalan, de lehetséges, hogy a 2023-as bolygóalbedó-albedominimum volt legalább 1940 óta a legalacsonyabb albedóérték.

A felszíni jellemzők változásai nem magyarázzák a bolygóalbedó 2015 óta bekövetkezett csökkenését:

- Az északi-sarki tengeri jég kiterjedése 1980 óta körülbelül 5 százalékkal csökkent (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), bár 2007 után az északi-sarki tengeri jég csökkenése szünetelt (England et al., 2025)
- Az antarktiszi tengeri jéggel kapcsolatban az IPCC AR6 arra a következtetésre jut, hogy „1979 és 2020 között az antarktiszi tengeri jég területén a regionálisan ellentétes trendek és a nagy belső változékonyság miatt nem volt jelentős tendencia.” (Összefoglaló a döntéshozók számára, A.1.5)
- Az északi féltekén az éves hótakaró 1967 óta lassan csökken, jelentősnek nem nevezhető tendenciával. Az adatok szerint az északi féltekén havasabb telek vannak, amelyeket tavasszal és nyáron gyorsabb olvadás kísér, lásd: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/> és 5.6. szakasz

- A globális zöldülés (2. fejezet) hozzájárul a bolygó albedójának csökkenéséhez, mivel az erdők albedója alacsonyabb, mint a nyílt területeké vagy a hóé. Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy az erdők megnövelik a felhőzetet (ami erős fényvisszaverő képességet jelent), és ez ellensúlyozza az erdőterület növekedésével járó közvetlen albedócsökkenést.



8.2. ábra: A Föld albedója (fényvisszaverő-képesség, százalékban) , az évszakok hatásának eltüntetésével Forrás: Hansen és Karecha (2025)

A felszíni fényvisszaverő képesség változásai hozzájárulnak a bolygó albedójának kismértékű, lassú csökkenéséhez. Ezek a változások azonban nem magyarázzák a bolygó albedójának 2015-ben kezdődő meredek csökkenését. Továbbá a felszíni albedó bármilyen változása átlagosan körülbelül háromszoros faktorral csillapodik, mindenekelőtt a felhőtakaró miatt (Loeb et al. 2019). A felszín albedóváltozása így csak gyenge hozzájárulást jelent a közelmúltbeli bolygóléptékű albedócsökkenésben, különösen ami az éves átlagot és a globális értéket illeti. Ezért a legvalószínűbb magyarázatot a meredek albedócsökkenésre a légköri aeroszolok és/vagy a felhők változásai adják.

Az aeroszolok a légkörben található apró részecskék, amelyek visszaverik a napfényt, és kölcsönhatásba léphetnek a felhőfolyamatokkal, hogy a felhők fényvisszaverőbbek legyenek. Az aeroszolok lehetnek természetes eredetűek (pl. talajból, tüzekből származó por), valamint emberi eredetűek: égetésből származók (beleértve a fosszilis tüzelőanyagokat is). Azok a régiók, amelyek zöldülnek és/vagy ahol megnő a csapadékmennyiség, kevesebb port termelhetnek. Az antropogén aeroszolok esetében három szakaszban, 2010-ben, 2015-ben és 2020-ban vezettek be új, a kénkibocsátás csökkentését célzó hajóüzemanyag-szabályozást. A szulfátrészecskék visszaverik a napsugárzást, így a tisztább levegő azt jelenti, hogy kevesebb napsugárzás verődik vissza, ami hozzájárul a felszín felmelegedéséhez. A szulfátaeroszolok közvetett hatásai közé tartozik, hogy a szubtrópusokon megnő az alacsony szintű felhők fényvisszaverő képessége. Vita övezi, hogy a szulfátkibocsátás változása mennyire jelentős a Föld sugárzási egyensúlyában (Hodnebrog et al., 2024; Yuan et al., 2024), de a főbb hajózási útvonalakra bevezetett korlátozás kismértékű globális hatásra utal (Schmidt, 2024).

A globális albedó 2015 óta tartó csökkenésére mindenekelőtt a felhők változásai adhatnak magyarázatot. A felhők tulajdonságainak közelmúltbeli változásaival két újabb tanulmány (Loeb et al., 2024; Goessling et al., 2024) is foglalkozott. Műholdas és újrafeldolgozási adatok figyelembevételével Loeb et al. megállapította, hogy az északi féltekén a bolygóalbedó csökkenésének fő oka az alacsony és a közepes szintű felhők 2015 óta tartó csökkenése, míg a déli féltekén a bolygóalbedó csökkenése elsősorban a közepes szintű felhők csökkenésének tudható be az összes földrajzi szélességi zónában. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a felhőanomáliák főként az alacsony szintű felhők csökkenésének tudhatók be. Az elmúlt évtizedben koherens alacsony szintű

felhőzet-csökkenéssel rendelkező régiók közé tartozik az Óceánia (Gél-kelet-Ázsia, „Maritime Continent”) körüli meleg medence régió és az északi extratropusi nyugati Csendes-óceán, valamint az Atlanti-óceán és a szomszédos szárazföldi régiók nagy része. Az ezekben az elemzésekben 2015 óta azonosított globális felhőzet-csökkenés 1-2 százalék.

A kérdés ezt követően az, hogy vajon mi a felhőzetváltozás oka. Az elmúlt évtizedben a csökkenő felhőzetre két magyarázat született:

- Természetes éghajlati változékonyság
- Az alacsony szintű felhőzet változása a tengerfelszín-hőmérséklet emelkedésével van összefüggésben, ami a klímaváltozásra adott pozitív visszacsatolás kialakulására utal (Hansen és Karecha, 2025)

Nem könnyű igazolni egy 2015-ben kezdődött új pozitív alacsonyfelhőzet-visszacsatolást, mivel nincs akkoriban fellépő egyértelmű oka, ami visszacsatolást váltott volna ki. Ebben az időszakban azonban számos természetes éghajlati jel van, amely a légköri cirkuláció változásaihoz kapcsolódik, és befolyásolhatja a felhők eloszlását:

- A 2014-2016-os időszak volt az egyik legerősebb El Niño esemény, amit valaha feljegyeztek
- A 2015-ben kezdődő hideg anomália az Atlanti-óceán északi szubpoláris örvényében az óceáni cirkulációs mintázat eltolódását tükrözi, ami az Atlanti-óceán évtizedes változékonyságával jár (Frajka-Williams et al., 2017; Arthun et al. 2021).
- A Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció (PDO) pozitív indexe 2016-ban tetőzött, majd csökkent, és 2019 vége óta a negatív tartományban van.
- A tengeralatti Hunga-Tonga vulkán kitörése 2022-ben

Az El Niño Déli Oszcillációhoz (ENSO) kapcsolódó évközi felhőanomáliák jelentős globális jellel és erős regionális jellel rendelkeznek, különösen a tropusi Indiai- és Csendes-óceán felett.

A Hunga Tonga kitörése figyelemre méltó, mivel egybeesik a 2023-as kivételesen alacsony bolygóalbedó értékkel. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a 2023-as felhőperturbációk a 2015 óta megfigyelt általános mintázattól eltérő mintázatot mutattak, a felhőzetcsökkenés az északi féltekén és a trópusokon volt a legkifejezettebb. A felhőzet regionális csökkenése a legkifejezettebb az Indiai-óceán keleti részén, Dél-Amerikában és a Csendes-óceán keleti részén, valamint Észak-Amerika északi részén, a Déli-óceánon a 60° déli földrajzi szélesség körül, a szubtrópusi és keleti Észak-Atlanti-óceánban, valamint az Észak-Csendes-óceán egyes részein volt.

A Hunga Tonga kitörése szokatlan volt, mivel szulfátrészecskék mellett nagy mennyiségű vízgőz jutott a sztratoszférába. Az első publikációk a sztratoszférikus cirkulációra gyakorolt hatásokra és a közvetlen sugárzási hatásra összpontosítottak. 2025-ben olyan tanulmányok jelennek meg, amelyek a Hunga Tonga felszíni éghajlatra gyakorolt közvetett hatásait földrendszer-modellekből származó együttes szimulációk segítségével vizsgálják (Bednarz et al., 2025; Kuchar et al., 2025). E tanulmányok statisztikailag szignifikáns hatásokat találtak a regionális éghajlatra. E hatásokat a sztratoszféra-troposzféra kapcsolatokról eredő cirkulációs változások okozták. A fenti tanulmányok a vulkáni tevékenység és az éghajlati dinamika közötti összetett kölcsönhatásokra utalnak. A Hunga Tonga-kitörés bolygóalbedóra gyakorolt hatásainak kibogozásához további kutatásokra van szükség.

Összefoglalva, a bolygóalbedó csökkenése és a felhőzet egyidejű csökkenése előtérbe állítja a felhők és a felhőváltozások jelentős szerepét a globális éghajlati változékonyságban, valamint a klímaváltozásban. A globális felhőzet 1-2 százalékos változása nagyobb sugárzási hatással van az éghajlatra, mint amekkora a CO₂ megduplázódásának közvetlen sugárzási hatása. Bár nehéz kibogozni a közelmúltbeli trend okait, a csökkenő felhőzet okára vonatkozó versengő magyarázatok jelentős következményekkel járnak az egyensúlyi klímaérzékenység kiértékelése és a közelmúltbeli felmelegedés okaként való értelmezése szempontjából. További 10 évnyi adat segíthet tisztázni, hogy ez a felmelegedéssel összefüggő erős pozitív felhő-visszacsatolás-e, vagy a természetes változékonyság által vezérelt átmeneti ingadozás.

8.5 Az éghajlati hatótényezőkrevonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC (Ranasinghe et al. 2021) az „éghajlati hatások mozgatórugóit” vagy CID-eket (Climate Impact Driver) úgy határozza meg, mint „a társadalom vagy az ökoszisztémák valamely elemét befolyásoló fizikai éghajlati rendszerfeltételeket (pl. eszközök, események, szélsőségek)”. Ezért a CID-ek az időjárási és az éghajlati rendszer azon jellemzői, amelyek az éghajlatváltozás hatásainak felmérésében elsődlegesen érdekesek, mivel potenciális hatással vannak az emberekre és a természeti világra. Például a „Hő és hideg” címszó alatt a CID-eket az átlagos levegőhőmérséklet, a szélsőséges hőség, a hideg időszakok és a fagy jelenti. Az IPCC azt is kiemeli, hogy a CID-ek nem feltétlenül károsak: a szóban forgó rendszertől függően lehetnek károsak, semlegesek, előnyösek vagy mindezek kombinációi.

Ranasinghe et al. (2021, 1856. o.) 12.12. táblázatának első oszlopai, amelyeket itt 8.1. táblázatként közlünk, összefoglalják az AR6 értékelését arról, hogy vajon az összes főbb időjárási tényezőben megjelent-e az antropogén hatás jele. A fejezet egyik témája, hogy az IPCC által használt attribúciós módszerek hajlamosak túlbecsülni az antropogén hatást, és alábecsülni a természetes változékonyság szerepét. Mindazonáltal az összefoglaló táblázat egyik feltűnő jellemzője, hogy milyen kevés időjárási tényező mutat olyan antropogén jelet, amely megkülönbözteti őket a természetes változékonyságtól.

A felsorolt 33 időjárási hatáskategória közül csak ötben állítanak *nagy megbízhatósággal* antropogén jelet, további négyben pedig *közepes megbízhatósággal*. (Megjegyzendő, hogy a CID-ek egyike maga a CO₂-szint emelkedése, és mivel ezt a megnövekedett CO₂-szintnek tulajdonítani szószaporítás (autológia), e CID figyelmen kívül hagyható.) A többi esetben az IPCC nem állítja, hogy antropogén tényezőket észlelt volna. Az öt *nagy megbízhatóságú* állítás közül kettő az átlaghőmérséklet (a legköri és óceáni) változásaira vonatkozik, ezek tehát nem a szélsőséges időjárás mértékei. Továbbá a négy *közepes megbízhatóságú* állítás közül kettő az óceánkémiai összetételhez kapcsolódik, azaz szintén nem a szélsőséges időjáráshoz. Az IPCC nem tart számon emberi befolyást számos nem hőmérsékleti időjárási jellemzőben, mint például a szél, a csapadék, az árvizek vagy az aszály.

Az IPCC 12.12. táblázatának egyéb oszlopai arról számolnak be, hogy ebben az évszázadban az RCP8.5 (a legszélsőségesebb kényszerítő forgatókönyv) szerint várhatóan antropogén jelek jelennek meg. Ezeket az oszlopokat több okból is kihagytuk. Először is, mert arra vonatkoznak, hogy a klímamodellek fognak-e kimutatható jeleket kivetíteni a megfigyelésekre, ami egészen más kérdés, mint amivel itt foglalkozunk: hogy mutattak-e ki jelet a történelmi adatokban. Másodszor, ahogy a 4. fejezetben tárgyaljuk, az RCP8.5 forgatókönyv egy félrevezető és valószínűtlen, szélsőséges történet, nem „alap eset” vagy szokásos üzletmenet-előrejelzés. Harmadszor, a részletes modellek együtteséről elismerik (Palmer és Stevens 2019), hogy „nem alkalmas a célra”, azaz a regionális változások leírására, és „nem képes a jövőbeli feltételeket olyan térbeli, időbeli és valószínűségi pontossággal ábrázolni, amellyel az előrejelzéseket gyakran készítik” (Nissan et al., 2019). Ezekkel a kikötésekkel együtt is megjegyezzük, hogy az AR6 12.12. táblázatának kihagyott oszlopai azt mutatják, hogy a legtöbb időjárási hatás a század végéig várhatóan nem mutat antropogén jelet.

Amint azt a 6. fejezetben tárgyaltuk, a szélsőséges időjárási rendszerek mintázataiban a természetes változékonyság dominál, és a trendészlelésre vonatkozó leegyszerűsített állításokat gyakran ássa alá a regionális heterogenitás és a trendek időbeli megfordulása. A 8.1. táblázat arra a kapcsolódó pontra mutat rá, hogy a legtöbb szélsőséges időjárási típus változásait jelenleg nem lehet emberi hatásoknak tulajdonítani. A szelet példaként véve az IPCC azt állítja, hogy az átlagos szélsébségekben, heves szélviharokban, trópusi ciklonokban vagy homok- és porviharokban nem jelent meg antropogén jel, és még szélsőséges kibocsátási forgatókönyv esetén sem várható ilyen ebben az évszázadban. Ugyanez vonatkozik az aszályra és a tüzesetekre is.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Aridity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fire weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwave	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Dissolved oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO ₂ at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease

Medium confidence of decrease

Low confidence in direction of change

Medium confidence of increase

High confidence of increase

8.1. táblázat: Az IPCC AR6 I. munkacsoportjának jelentéséből a 12.12. táblázat 1. oszlopának reprodukciója. Antropogén jel megjelenése a történelmi időszakban a bemutatott CID-ek esetében. Fehér: nincs észlelt jel. Kék és narancssárga: az észlelt változás (csökkenés vagy növekedés), valamint a színes jelmagyarázatban jelzett megbízhatósági szint. A számok adott régiókra és megbízhatósági szintekre utalnak: a megjegyzéseket lásd az eredeti táblázatban.

8.6 Szélsőséges eseményekre (EEA) vonatkozó oktatájdónítás

Az IPCC szélsőséges időjárási és éghajlati események attribúciója (oktatájdónítása, Extreme Event Attribution) általánosabb vizsgálata során az AR6 homályos értelmű értékelést ad az antropogén felmelegedés szerepéről, a különféle fejezetekben eltérő értelmezést szerepeltet. A WG1 11. fejezete kimondja (Seneviratne et al., 2021):

A szélsőségek megfigyelt változásainak bizonyítékai és azok emberi befolyásnak való oktatájdónítása (beleértve az üvegházhatású gázok és aeroszok kibocsátását, valamint a földhasználat változásait) az AR5 óta megerősödött, különösen a szélsőséges csapadék, az aszályok, a trópusi ciklonok és az összetett szélsőségek (így a száraz/forró események és a tüzesetek) esetében. Néhány közelmúltbeli forró szélsőséges esemény rendkívül valószínűtlen lett volna az éghajlati rendszerre gyakorolt emberi befolyás nélkül.

Ezzel szemben, ahogy a 8.5. szakaszban is megjegyeztük, a WG1 12. fejezete (12.12. táblázat) más képet fest – feltehetően a két fejezethez tartozó különböző szerzőcsoportok szakértői eltérő következtetésekre jutottak (Ranasinghe, 2021):

- Nagy valószínűséggel növekszik a szélsőséges hőség eseményszáma a trópusi régióban, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést, és a közepes földrajzi szélességek legtöbb régiójában, valamint közepes valószínűséggel máshol.
- Közepes valószínűséggel csökken a szélsőséges hideg eseményszám Ausztráliában, Afrikában és Dél-Amerika északi részének nagy részén, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést.
- Nincs bizonyíték arra, hogy a történelmi időszakban megváltozott volna a folyók áradása, a heves csapadék, az aszály, a tüzesetek, a heves szélviharok és a trópusi ciklonok előfordulása.

Bár a szélsőséges időjárási eseményekben bekövetkező változások észlelésének és azok oktatájdónításának általános kérdése továbbra sem egyértelmű, az ezen a területen végzett tevékenységek nagy része az egyes szélsőséges időjárási események oktatájdónítására vonatkozik. A szélsőséges események oktatájdónításával kapcsolatos legnagyobb erőfeszítést a World Weather Attribution (WWA; worldweatherattribution.org), egy nemzetközi kutatási kezdeményezés fejt ki. Céljuk annak elemzése, hogy az éghajlatváltozás hogyan befolyásolja a szélsőséges időjárási események valószínűségét és intenzitását. Megközelítésük az, hogy regionális klímamodellek nagyméretű együtteseit használják fel arra, hogy összehasonlítsák a mai éghajlaton bekövetkező eseményeket egy iparosodás előtti, emberi befolyás nélküli ellentmondásos (kontrafaktuális) éghajlaton bekövetkező eseményekkel.

A WWA kiemelkedő nyilvános jelenlétet tanúsít a szélsőséges időjárás és az éghajlatváltozás közötti kapcsolat terén, sajtóközleményei a nyilvános és politikai vitákban jelentős figyelmet kapnak. A WWA lektorálatlan eredményeinek széles körű népszerűsítése, a peres eljárásokban hasznosítható elemzések alakításának nyílt elismerése, valamint módszertani kihívásai azonban vitákat váltottak ki, a kritikusok pedig megkérdőjelezzik következtetéseik megalapozottságát és pártatlanságát (Pielke Jr. 2024). Ezen problémák ellenére a WWA munkája továbbra is befolyásolja az éghajlattudományi és médiabeli narratívákat. A megközelítéssel kapcsolatos technikai kritikák közé tartozik a formális észlelési folyamat hiánya; az a hallgatóságos feltételezés, hogy az ipari forradalom utáni felmelegedés 100 százalékát üvegházhatású gázok okozzák; valamint a belső éghajlati változékonyság megfelelő figyelembevételének elmulasztása.

Mivel az EEA témaköre viszonylag új, a szakértői szakirodalomban számos alapvető módszertani kérdés még nem rendeződött. Fontos kihívást jelent az adatok hiánya. A szélsőséges események ugyanis definíció szerint ritkák. Számos, szélsőséges eseménytípust elemző vizsgálat

(beleértve az Egyesült Államok Nemzeti Értékelő Jelentéseit is) csak az 1950 vagy az 1970 óta gyűjtött adatokat értékeli. Azonban, ahogyan a 6. fejezetben is hangsúlyoztuk, az Egyesült Államok történelmének számos legsúlyosabb szélsőséges időjárási és éghajlati eseménye a 20. század első felében vagy azt megelőzően (pl. a 19. század elején) történt. És ha paleoklíma-rekonstrukciókat veszünk figyelembe, nagyon nehézé válik egy esemény számára, hogy átlépje a természetes változékonyságtól elvárható akármekkora küszöbértékeket, különösen, ha egy ésszerű méretű földrajzi régiót veszünk figyelembe.

Egy másik kihívás a vizsgált esemény meghatározása. A statisztikában és az ökonometriában régóta létezik olyan szakirodalom, amely a kiugró értékeket tartalmazó adatok elemzésének kihívásairól szól. A probléma azért merül fel, mert egy adatsor egy valószínűségi eloszlást hoz létre, amely meghatározza a megfigyelések várható tartományát. Ha kiugró értéket figyelünk meg, az arra utalhat, hogy az adateloszlást kiváltó mögöttes folyamat megváltozott (ami az időjárási kontextusban azt jelentené, hogy éghajlatváltozást észleltek), vagy hogy az mögöttes folyamatnak több állapota van, amelyek mindegyikének eltérő a valószínűségi eloszlása, ebben az esetben egy kiugró érték megfigyelése egyszerűen azt jelenti, hogy átmenetileg egy másik rállapotban voltunk, de maga a rendszer változatlan maradt. Ha egy idősor csak egyetlen kiugró eseményt tartalmaz a sorozat végén, akkor nem lehet meghatározni, hogy melyik modell a helyes (Chen és Liu 1993). Például létezhet egy „szokásos” időjárási állapot, amely egy adott tengerparti régióban a nyári nappali maximumok eloszlását eredményezi, és egy második, ún. „hőhullám”-állapot, amely akkor lép be, amikor egy szárazföldi blokkoló esemény következik be, ami 15°C-kal magasabb középhőmérséklet-eloszlást eredményez, mint az első. Egy olyan nap, amelynek hőmérséklete 13°C-kal magasabb a normálisnál, vagy extrém hőanomália lenne az első állapotban, vagy némileg hűvös esemény a másodikban, és ebben az esetben statisztikai alapon nincs mód arra, hogy megtudjuk, melyik nézet a helyes.

Visser és Petersen (2012), valamint Sardeshmukh et al. (2015) is rámutatnak, hogy aegyműstől eltérő eloszlások egyformán jól illeszkedhetnek a megfigyelt adatokhoz, de egy adott időjárási esemény valószínűségére vonatkozóan nagyon eltérő következményekkel járhatnak. Visser és Petersen azzal érvelnek, hogy a szélsőséges időjárási elemzések mély bizonytalanságaira való tekintettel kerülni kell az egyes események és a globális klímaváltozás közötti összefüggés megállapítását. Továbbá, egyetlen kiugró érték léte egy adatsor végén felveti azt a problémát, hogy az események valószínűségének becslése torzított lesz, függetlenül attól, hogy a kiugró értéket belefoglaljuk-e vagy sem (Barlow et al., 2020). Az torzítás kiküszöbölésére szolgáló módszereket még nem dolgozták ki, ami arra késztette egyes szakértőket (pl. Miralles és Davison 2023), hogy azt állítsák, hogy olyan helyzetekben, ahol egy adatsor egyetlen szélsőséges eseményt tartalmaz a végén, a szélsőséges esemény visszatérési időszakának becslése annyira torzított és bizonytalan lesz, hogy azt teljesen el kell kerülni. Egy esettanulmányt közlünk egy nemrégiben az Egyesült Államokban lezajlott, nagy hatású szélsőséges eseményről, hogy bemutassuk azokat a kihívásokat és kétértelmőségeket, amelyekkel a szélsőséges időjárási események gyakoriságának és intenzitásának az antropogén felmelegedésnek való hozzárendelése (oktalajdonítása) jár.

8.6.1 Esettanulmány – az2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

Észak-Amerika nyugati felén 2021-ben bekövetkezett hőhullám egy szélsőséges esemény volt, amely 2021 júniusának végén a térség nagy részét érintette. Felszínhőmérséklet-rekordok dőltek meg Portlandben, Oregonban (41°C; korábbi rekord 40°C) és Seattle-ben, Washingtonban (40°C; korábbi rekord 40°C) (Mass et al., 2024).

A WWA csapata elemzésével nemzetközi címlapokra került, amely a következő attribúciós állításokat tartalmazta (WWA, 2021; Philip et al., 2022):

- Megfigyelések és modellezés alapján ennek a hőhullámnak a bekövetkezése gyakorlatilag lehetetlen lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- A becslések szerint a mai éghajlaton az esemény előfordulása körülbelül 1000 évente egy.

- Az esemény legalább 150-szer ritkább lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- E hőhullám körülbelül 2°C-kal melegebb volt, mint amilyen az ipari forradalom kezdetén lett volna (amikor a globális átlaghőmérséklet 1,2°C-kal hidegebb volt, mint ma).

Az első állítás fontos ellentmondása azonban az, hogy más kutatók a történelmi időjárási adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy bár a megfigyelt nagyságrendű hőhullám gyakorlatilag lehetetlen antropogén klímaváltozás nélkül, *természetes klímaváltozás esetén is* gyakorlatilag lehetetlen. Bercos-Hickey (2022) megjegyezte, hogy „ezek a hőmérsékletek gyakorlatilag lehetetlenek voltak bármilyen korábban tapasztalt meteorológiai körülmény között, globális felmelegedéssel vagy anélkül”. McKinnon és Simpson (2022) kijelentették, hogy „a legvalószínűbb magyarázat továbbra is az, hogy az időjárási esemény maga volt a 'balszerencse'.” A 2023-as oregoni klímaértékelés (Fleischman, 2023) arra a következtetésre jutott, hogy a hőkupola klímaváltozás nélkül is kialakult volna, és „nincs bizonyíték arra, hogy a hőkupolát előidéző időjárási jellemzők rendkívül szokatlan kombinációját a klímaváltozás valószínűbbé tette volna, továbbá a klímamodellek nem vetítik előre a magasnyomású hátságok gyakoriságának növekedését a Csendes-óceán északnyugati részén” (Fleischman, 2023, 49. o.).

Mass et al. (2024) összesítik a hőhullámhoz vezető összetett események közelítő sorrendjét. A troposzféra középső részén rekordmagasságú hátság húzódott a Csendes-óceán északnyugati térségében, amit a nyugati Csendes-óceánban zajló trópusi zavar kényszerített ki. Ez rekordmagas közép-troposzférabeli hőmérsékleteket, az alsó légkörben erős süllyedést, alacsony szintű keleti áramlást okozott, amely a regionális terepen lefelé irányuló felmelegedést és a hűvösebb tengeri levegő eltávolítását eredményezte, valamint egy közeledő alacsony szintű vályút, amely fokozta a lefelé irányuló áramlást. Az esemény a maximális napsugárzás és a normálisnál szárazabb talajnedvesség idején történt. Egy történetiszálas megközelítést alkalmazva Mass et al. úgy értékelte, hogy a Csendes-óceán északnyugati részén nem volt megfigyelhető aszály és talajszáradási tendencia; nincs bizonyíték arra, hogy a globális felmelegedés erősebb magasnyomású gerinceket eredményezne, és nem figyeltek meg hőhullám- vagy rekordhőmérséklet-tendenciáját a régióban. Arra a következtetésre jutottak, hogy bár az antropogén felmelegedés akár 2°F-kal is hozzájárulhatott az esemény nagyságrendjéhez, kevés bizonyíték van arra, hogy az üvegházhatású gázok növekedése tovább erősítette volna az eseményt.

Bercos-Hickey et al. (2022) statisztikai elemzést végzett a hőhullám modellalapú attribúciós vizsgálatáról. Mivel az esemény nagyon kiugró érték, és messze meghaladja a történelmi adatokból illesztett általánosított szélsőérték-eloszlások határait, arra a következtetésre jutottak, hogy a visszatérési időkre, az esemény nagyságának és gyakoriságának mennyiségi változásaira, valamint a szélsőséges hőmérsékletek valószínűségére vonatkozó becslések, amelyeket a WWA szolgáltatott, nem pontosak, és alacsony megbízhatóságúnak kell értelmezni őket. Azt találták, hogy a regionális éghajlati modellek együttesét használó utólagos attribúciós módszerek, kombinálva Pearl (2009) ok-okozati következtetéseivel, korlátozott és feltételes információkat képesek szolgáltatni az emberi befolyás nagyságrendjéről erre a hőhullámra – egy szigorúbb becslést adtak, miszerint az emberi tevékenységek ~1,4–1,8 °F-os növekedést okoztak a napi maximumhőmérsékletekben.

Zeder et al. (2023) szintén arra a következtetésre jutott, hogy a Philip et al. (2022, a WWA elemzése) által alkalmazott módszerek hajlamosak eltúlozni a szélsőséges hőhullámok ritkaságát, ami a klímaváltozás hőhullám-eseményre gyakorolt hatásának elfogult észleléséhez vezet: „A megfigyelt szélsőséges hőhullám-események visszatérési időszakának túlbecslésére való hajlam azt a benyomást táplálhatja, hogy a látszólag lehetetlen hőhullám-szélsőségek jelenleg példátlan ütemben csoportosulnak.”

A 2021-es hőhullám egy ritka és példa nélküli összetett időjárási esemény volt, amely akár 9°F-kal is megdöntötte az évszázados hőmérsékleti rekordokat. Míg a WWA-csapat világszerte nyilvánosságot kapott az antropogén klímaváltozást okoló gyors állításai közzétételéhez, a későbbi

lektorált elemzések kimutatták, hogy az eseményt ritka meteorológiai körülmények okozták, amelyeket a globális felmelegedés nem tett valószínűbbé.

Hivatkozások

- Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15(6), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s003820050291>
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. *Journal of Climate*, Vol 34
- Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach.” *Management of Environmental Quality* 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.
- Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* August 2020, Pages 765–789, <https://doi.org/10.1111/rssc.12420>
- Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970>
- Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophysical Research Letters*, 49(23), e2022GL099396. <https://doi.org/10.1029/2022GL099396>
- Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*, 222, 103820
- Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>
- Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 284–297. <http://www.jstor.org/stable/2290724>
- Chen, H, SX Chen and M Mu (2023) A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. *Climate Dynamics* 62:1439-1446 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06975-5>
- Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3271–3279. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7>
- Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6), 131. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 979–1037). Cambridge University Press.

- Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023
- Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, <https://doi.org/10.1111/rssa.12557>
- Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Turasie (2015) Time series modeling of paleoclimate data *Environmetrics* 27(1) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373>
- Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. *Journal of Environmental Economics and Management* 76:67—85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911>
- England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi-decadal pause in Arctic sea ice loss. *ESS Open Archive*. March 29, 2025.
- Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. <https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments>
- Forster et al. (2024) “Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence” *Earth System Science Data* 17(6) <https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>
- Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Scientific Reports*, 7:11224
- Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280>
- Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>
- Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. *WIREs Climate Change*, DOI: 10.1002/wcc.522
- Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14, 123006
- Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth’s energy imbalance. *Communications Earth and Environment* 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8
- Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–881). Cambridge University Press.
- <https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity>

- Kravtsov, S., Westgate, A., & Gavrilov, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. *Climate Dynamics*, 62, 10281–10306. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4>
- Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörimann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption and the associated surface response, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 3623–3634, <https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025>.
- Lewis, Nicholas (2023) “Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence,” *Climate Dynamics* 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>.
- Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4), 503–534. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3>
- Loeb, N. G. et al. (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. *Journal of Climate* 32(16), 5003–5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1
- Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth’s Energy Budget since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757–1783
- Mass, C., et al. (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. *Weather and Forecasting*, 39(2), 275–291. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1>
- Matthes, K., et al. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKittrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. *Climate Dynamics*, 58(1–2), 405–411. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7>
- McKittrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. *Environmetrics*, 35(2), e2835. <https://doi.org/10.1002/env.2835>
- McKittrick, Ross R (2022) On the choice of TLS versus OLS in climate signal detection regression. *Climate Dynamics* 10.1007/s00382-022-06315-z
- McKittrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. *Climate Dynamics* forthcoming preprint available at www.rossmckittrick.com
- McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) “Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011637>.
- Miralles, Ophélie and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes* 41 100584 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, et al. (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wires Climate Change* 14 March 2019 <https://doi.org/10.1002/wcc.579>
- Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (49) 24390-24395 <https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Pearl, J. (2009). *Causality*. Cambridge University Press.
- Philip, S. Y., et al. (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1689–1713. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>
- Pielke Jr., Roger (2024) *Weather Attribution Alchemy*. Substack essay <https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
- Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," *Journal of Economics and Econometrics*, vol. 65(2), pages 13-47.
- Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. *Journal of Climate*, 28(23), 9166–9187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1>
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321
- Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," *Atmosphere* 12, no. 2: 147, <https://doi.org/10.3390/atmos12020147>
- Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. *Nature* 627, 467. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>
- Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," *Journal of Space Weather and Space Climate* 11: 40, <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>.
- Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Solanki, S.K. et al. (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," *Nature* 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, <https://doi.org/10.1038/nature02995>.
- Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," *Climate* 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, <https://doi.org/10.3390/cli9110163>.
- Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447
- Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6227-6233 <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114>

- Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) “Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, <https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110>.
- Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) “Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints,” *Astronomy & Astrophysics* 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>.
- Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) “Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century,” *New Astronomy* 34 (January 2015): 221–233, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods *Climates of the Past* 8, 265–286 <https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf>
- World Weather Attribution (2021) “Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change.” July 7, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>.
- Yuan, et al. (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. *Communications Earth and Environment* 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3
- Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104090. <https://doi.org/10.1029/2023GL104090>

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

Fejezet-összefoglaló

A legutóbbi évtizedek során számos bizonyíték gyűlt össze arra vonatkozóan, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények (így a mezőgazdasági növények) számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdasága számára összességében előnyös. A légköri CO₂-szint emelkedése az összes főbb amerikai növényfaj termését növelte. Joggal feltételezhető, hogy az éghajlatváltozás összességében semleges vagy előnyös, és az amerikai mezőgazdaság legnagyobb része számára továbbra is az marad.

9.1 Ökonometriai elemzések

Az mezőgazdaságra gyakorolt klímaváltozási hatások ökonometriai elemzéseivel az a törekvése, hogy a hosszú távú terméshozam-változásokra adott információkat a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra adott válaszként, a gazdálkodók alkalmazkodási viselkedésére vonatkozó feltételezések alapján összegezze. Az egyik módszer a mezőgazdasági földterületek értékváltozásaira összpontosít. Az indoklás az, hogy ha az éghajlatváltozás hosszú távú nettó előny a mezőgazdaság számára, akkor azt a mezőgazdasági földterületek magasabb piaci értékének növelésére kell tőkésíteni, és fordítva. Míg az egyes növények profitálhatnak vagy károsodhatnak az éghajlatváltozásból, a gazdálkodók alkalmazkodási válaszait figyelembe véve a mezőgazdasági földterület értéke annak indexét képviseli, hogy a változások várhatóan előnyösek-e vagy sem. Mendelsohn et al. (1994) megvizsgálták a történelmi éghajlatváltozások és a mezőgazdasági földterületek értékének kapcsolatát, és arra a következtetésre jutottak, hogy a globális felmelegedés kismértékben előnyös lenne az amerikai mezőgazdaság számára.

Mendelsohn et al. módszere, amit David Ricardo, a földérték-tanulmányozásban úttörő 19. századi brit közgazdász után ricardói elemzésnek neveztek el, később kritika érte a szerzők részéről, akik azzal érveltek, hogy e módszer nem veszi figyelembe a földértékek közötti különbségeket, amelyek a fix helyhez kötött jellemzőknek tulajdoníthatók, így például a talajminőségnek, valamint a nem éghajlati változásoknak, beleértve a közeli urbanizációt is. Deschênes és Greenstone (2007) a mezőgazdasági profitot vizsgálták a földértékek helyett, és Mendelsohn et al. (1994) következtetéseihez hasonló következtetésekre jutottak, nevezetesen arra, hogy a múltbeli éghajlatváltozások viszonylag csekély hatással voltak a gazdaságok jövedelmezőségére, és hogy a felmelegedés összességében valószínűleg csekély előnyökkel járna az amerikai mezőgazdasági ágazat számára. A kritikusokkal folytatott későbbi eszmecsere azonban arra készítette őket (Deschênes és Greenstone 2012), hogy felülvizsgálják következtetéseiket, és a klímafelmelegedés miatt az amerikai mezőgazdaságban potenciálisan nagy veszteségeket jósoljanak.

Burke és Emerick (2016) az 1980 és 2000 közötti hőmérséklet-ingadozásokat vizsgálták, és azzal érveltek, hogy a gazdák nem voltak képesek úgy alkalmazkodni a hőmérséklet-változásokhoz, mint ahogyan azt a ricardói módszer feltételezi, és hogy a klímaváltozás nagy negatív hatással lenne a kukorica- és szójab hozamokra. Schlenker és Roberts (2009) hasonlóképpen érveltek amellett, hogy a múltbeli felmelegedésből származó hozamnövekedés nem fog átragadni a jövőbe, és a kukorica- és szójab hozamok meredeken csökkenni fognak ebben az évszázadban az éghajlatváltozás miatt.

Két újabb tanulmány azzal érvelt, hogy az ilyen pesszimista eredmények nem megbízhatóak. Ortiz-Bobea (2019) szerint a földértékek összesítik a mezőgazdasági és nem mezőgazdasági hatásokat, és az utóbbiakat ki kell szűrni. Létrehozott egy adathalmazt, amely a mezőgazdasági tevékenység készpénzes bérleti díjait használja a földérték mérésére, kifejezetten a mezőgazdasági tevékenység esetében. Míg a földérték-modell a klímafelmelegedés miatti jövőbeni veszteségeket vetített fel, ugyanez a modell, amelyet készpénzes bérleti díjakkal becsültek, nem ezt tette, ami arra vezetett, hogy a szerző arra a következtetésre jutott, hogy a pesszimista eredmények a mezőgazdasági tevékenység hozamának pontatlan mérésének következményei. Bareille és Chakir (2023) egy nagy adatbázist állított össze a franciaországi mezőgazdasági eladási árakról olyan ingatlanok esetében,

amelyeket 1996 és 2019 között kétszer adtak el. Hagyományos ökonometriai modellezéssel meg tudták ismételni a felmelegedés mezőgazdasági földértékekre gyakorolt negatív hatásait mutató pesszimista eredményeket. De kihasználva az ismételt értékesítési adatokat, amelyek információt nyújtanak a földárak helyspecifikus változásairól, úgy találták, hogy az eredmények fordítottak, és arra utalnak, hogy a klímaváltozás nagyon előnyös lesz a francia mezőgazdaság számára. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy az alkalmazkodást figyelembe véve a melegedő éghajlat a korábban becsültnél két-húszszor nagyobb pozitív előnyökkel járna a francia mezőgazdaság számára. Átlagosan, teljes alkalmazkodás esetén úgy találták, hogy a közepes RCP4.5 forgatókönyv szerinti klímaváltozás 2100-ra megduplázhathatja a francia termőföld értékét.

Mindezek a tanulmányok egyik fő hiányossága azonban, hogy kihagyják a CO₂-trágyázás szerepét. A klímaváltozást, ahogyan az jelen jelentéshez kapcsolódik, az üvegházgáz-kibocsátás, főként a CO₂ okozza. A fent említett ökonometriai elemzések csak a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra összpontosítanak, és nem veszik figyelembe a további CO₂ jótékony növekedési hatását, amely ezeket hajtja. Amint a 2. fejezetben kifejtettük, a CO₂ a növények növekedésének egyik fő mozgatórugója, így ez a mulasztás az elemzést a klímaváltozás mezőgazdaságra gyakorolt előnyeinek alábecsülése felé torzítja.

9.2 A CO₂-dúsulás terepi és laboratóriumi vizsgálatai

A CO₂ növény-növekedésre gyakorolt hatását többek között a „szabad levegős dúsítási kísérletek” (FACE-parcellák) segítségével vizsgálták, amelyek során a növényeket körülvevő mezőkön kis CO₂-forrásokat helyeznek el, és rögzítik a növekedési reakciót a megnövekedett CO₂-szintre változó időjárási körülmények között. Ainsworth et al. (2020) körülbelül 250 ilyen vizsgálat eredményeit foglalja össze. Úgy találták, hogy a CO₂ 200 ppm-es emelése átlagosan a C3 növények terméshozamában 18 százalékos növekedést eredményezett. A C4 növények főként aszályos körülmények között mutattak előnyöket.

A FACE-parcella-kísérletek mellett több ezer laboratóriumi kísérletet végeztek a CO₂ hatásairól mindenféle növény növekedésére. Itt áttekintünk néhány eredményt a kulcsfontosságú amerikai mezőgazdasági növényekről.

Szója

A megnövekedett CO₂-koncentráció szójabab (*Glycine max* (L.) Merr.) növényekre gyakorolt hatásáról a kínai Huang-Huai-Hai síkság vízhiányos régiójában végzett tanulmányok kimutatták, hogy a megnövekedett CO₂-koncentráció javította a fotoszintézis sebességét, a vízfelhasználás hatékonyságát és a növekedést Li (2013) mind normál, mind aszályos körülmények között. A CO₂Science.org weboldal 108 publikált kísérletről számol be 1985 és 2019 között, amelyekben a szójababot dúsított CO₂-szintnek tették ki. Egy +300 ppm-es általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +50,9 százalék volt. Tíz tanulmány számolt be +600 ppm CO₂-dúsításról is, amely átlagosan 90,3%-kal növelte a fotoszintézist.

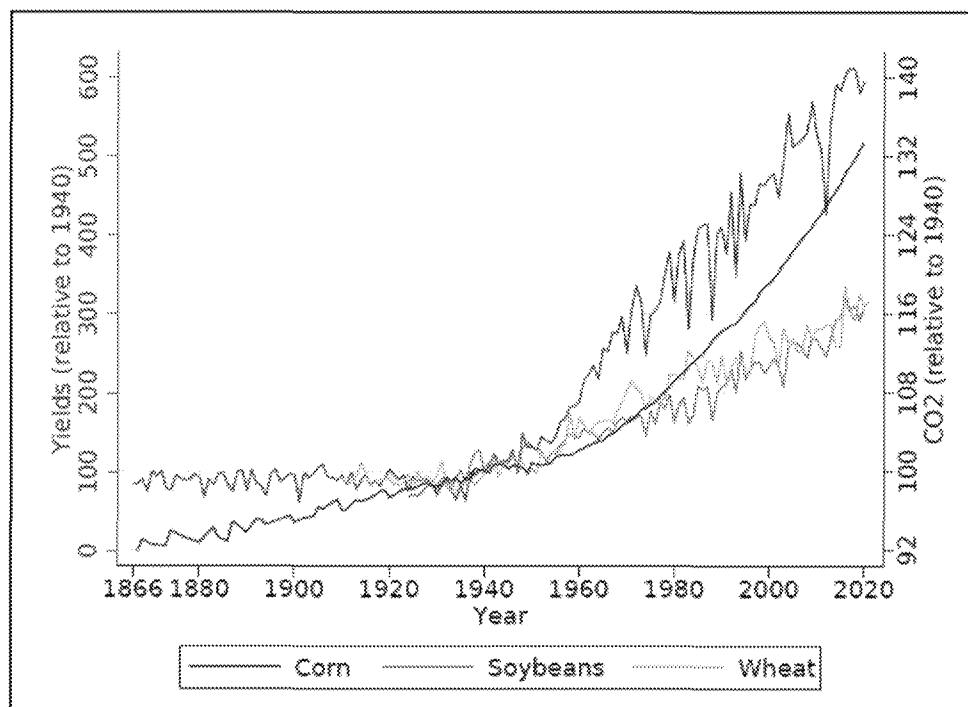
Kukorica

A CO₂Science.org weboldal 28 publikált kísérletről számol be 1983 és 2018 között, amelyekben kukoricát (*Zea mays* L.) tettek ki dúsított CO₂-szintnek. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +23,7 százalék volt. A kukorica a megnövekedett CO₂-szint mellett a szárazságtűrésből is profitál. Egy kísérleti tanulmány (Allen Jr., 2011) a növényeket napsütötte, szabályozott környezetű kamrákban 360 ppm (környezeti) és 720 ppm (emelt) CO₂-szint mellett vízstressznek tették ki. A szárazságstressz 41 százalékos növekedésvesztést okozott környezeti CO₂-szint mellett, de csak 13 százalékos veszteséget emelt CO₂-szint mellett.

Búza

A CO₂Science.org weboldal 92 publikált kísérletről számol be 1983 és 2020 között, amelyekben a közönséges búzát (*Triticum aestivum* L.) dúsított CO₂-szintnek tették ki. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +67,6 százalék volt. Blandino (2020) megmérte egy „javító”

hibrid búzafajta és szőlőfajtáinak terméshozamát és tápértékét megemelt CO₂-szint (+166 ppm) mellett. A jelentések szerint a szemtermés +16 százalékkal nőtt, de a szemfehérje-szint 7 százalékkal csökkent. Azt is megállapították azonban, hogy a különböző búzafajták tápértéke eltérően reagált a megemelkedett CO₂-szintre, így megfelelő fajtaválasztással a termelők olyan búzafajtákat választhattak, amelyek a legjobban élnek a megemelkedett CO₂-szint által jelentett körülményekkel.



9.1. ábra: Az Egyesült Államok átlagos CO₂-szintje és a kukorica, a szója és a búza terméshozamai normalizálódtak, így 1940=100. Forrás: Taylor és Schlenker (2021)

További bizonyítékok

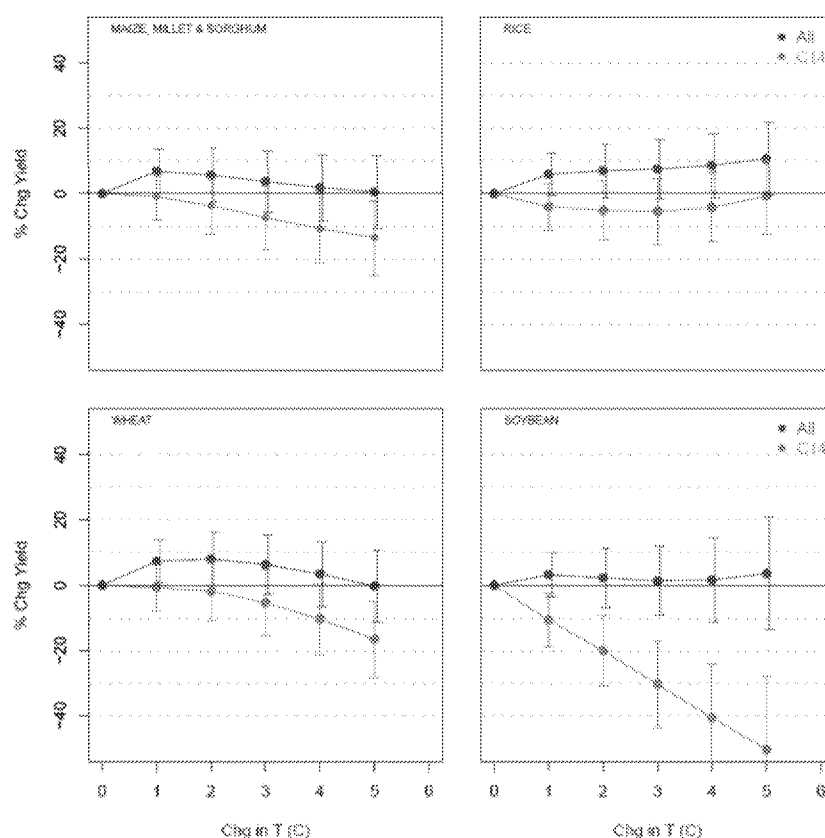
Az Egyesült Államok Nemzeti Gazdaságkutató Irodájának 2021-es jelentése (Taylor és Schlenker 2021) az Egyesült Államokban műholdas mérésekkel megfigyelt kültéri CO₂-szinteket használt fel, amelyekhez megyei szintű mezőgazdasági termelési adatokkal és más gazdasági változókkal illesztettek. Az időjárás, a szennyezés és a technológia hatásainak kiszűrése után a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a CO₂-kibocsátás 1940 óta 50-80 százalékkal növelte az amerikai növénytermesztést, ami sokkal nagyobb nyereséget eredményezett, mint amennyit korábban FACE-kísérletekkel becsültek. Úgy találták, hogy a CO₂-koncentráció minden ppm-es növekedése 0,5 százalékkal növeli a kukorica, 0,6 százalékkal a szójabab és 0,8 százalékkal a búza terméshozamát.

A növekedési előnyökön túl a többlet CO₂ fokozza a növények szárazsággal szembeni ellenálló képességét. Lásd a 2.1.3. szakaszban található diszkussziót.

9.3 Termésmodellezési metaelemzések

Annak ellenére, hogy bizonyítékok bősége áll rendelkezésre arra, hogy a CO₂ és a CO₂ által kiváltott felmelegedés növény-növekedésre közvetlenül előnyös, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA 2023) 2023-ban körülbelül ötszörösre növelte a szén-dioxid társadalmi költségének (SCC) becslését, nagyrészt a klímafelmelegedés okozta globális mezőgazdasági károk nagyon pesszimista 2017-es becslése alapján (Moore et al., 2017). Az EPA által használt két kármodell egyike a 2030-as szubszaharai szelek közel felét a Moore et al. (2017)

elemzése alapján előre jelzett globális mezőgazdasági károknak tulajdonította. Ez a tanulmány különféle éghajlati felmelegedési forgatókönyvek mellett végzett metaanalízist mezőgazdasági növények hozamváltozásait szimulálására. A Moore et al.-féle tanulmány a felmelegedés miatt minden növénytípusra és minden régióra vonatkozóan a globális terméshozam csökkenését vetítette előre.



9.2. ábra: Terméshozamok CO₂-indukált éghajlati felmelegedés esetén. Kék: Moore et al. (2017) publikációja szerint. Zöld: a kihagyott adatok figyelembevétele után. Forrás: McKittrick (2025).

McKittrick (2025) újra megvizsgálta a Moore et al. adatbázisát, és megállapította, hogy bár az Moore-ék állítása szerint 1722 tanulmányt fed le, a ezeknek csak a fele (N=862) tartalmazott teljes megfigyelést, így a regresszioanalízishez rendelkezésre álló minta sokkal kisebb volt, mint amit a két tanulmány jelzett. McKittrick megjegyezte, hogy a leggyakrabban hiányzó megfigyelési tételek a környezeti CO₂-változás volt, és megállapította, hogy ezek sok esetben az alapul szolgáló tanulmányokból vagy az eredeti éghajlati forgatókönyv-táblázatokból visszanyerhetők voltak, ezáltal a felhasználható minta méretét 40 százalékkal megnövelte. Az újonnan rendelkezésre álló adatokat tartalmazó terméshozam-előrejelzések jelentősen megváltoztak. Amint a 9.2. ábra mutatja, míg a részleges adatkészlet a felmelegedés hozamcsökkenését sugallta (kék vonalak), a teljes adatkészlet állandó vagy növekvő globális hozamokat jelzett, még 5°C-os felmelegedés esetén is (zöld vonalak).

9.4 A CO₂-trágyázás és a tápanyagvesztés

A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂ által kiváltott biomassza-növekedést néha a fehérje és egyéb kulcsfontosságú tápanyagok, például a vas és a cink koncentrációjának csökkenése kíséri (Ebi et al. 2021). Néhány kísérlet kimutatta, hogy a magasabb CO₂-szinttel várhatóan együtt járó emelkedő hőmérséklet ellensúlyozza ezt a veszteséget (Köhler et al. 2019), bár az erre vonatkozó bizonyítékok vegyesek, akár csak az a bizonyíték, hogy a mai napig megfigyelt tápanyag-hígulás teljes mértékben a magasabb CO₂-szintnek tulajdonítható (Ziska 2022). Ha tápanyag-hígulás következik be a növekvő CO₂-szint mellett, számos adaptív stratégia alkalmazható.

Először is, a mikrotápanyag-tartalom növelésére irányuló szelektív nemesítés (Saltzman et al. 2017) már bevált és költséghatékony agronómiai stratégiának bizonyult (Ebi et al. 2021). A stratégiák jelenthetnek mind hagyományos nemesítést, mind genetikailag módosított szervezeteket. Ez utóbbira példa az aranyrizs, amely megnövelt mennyiségű béta-karotint tartalmaz az A-vitamin az emberi szervezetben való bioszintézisének fokozása érdekében. Az optimális stratégiák helyspecifikusak, mivel növényenként, éghajlatonként és talajtípusonként változnak (Ebi et al. 2021). Másodszor, az élelmiszerek mikrotápanyagokkal való dúsítása már rutinszerű. A folsavat (egy B-vitamin) lisztbe és sok más élelmiszerbe adják; jódot adnak az asztali sóhoz, a legtöbb kereskedelmi forgalomban kapható reggeli gabonapelyhet vassal és számos vitaminnal dúsítják stb. Harmadszor, a multivitamin tabletták formájában kapható étrend-kiegészítők olcsók, széles körben elérhetők és rutinszerűen fogyasztják őket.

Az adaptív stratégiákra való támaszkodással kapcsolatos egyik aggodalom az, hogy megvalósíthatók-e az alacsony jövedelmű országokban. A mikrotápanyag-hiány már most is problémát jelent a fejlődő világban, és az étrend-kiegészítők hatékony, alacsony költségű válasznak bizonyultak (Ebi et al. 2021). Azt is meg kell jegyezni, hogy az IPCC magas szintű felmelegedést generáló kibocsátási forgatókönyvei erős jövedelemnövekedést istartalmaznak. Az SSP forgatókönyvek³ azt feltételezik, hogy a 2005-ös szinthez képest a globális egy főre jutó jövedelem 2100-ra legalacsonyabb növekedési esetben (SSP3) megduplázódik, a legmagasabb kibocsátási esetben (SSP5) pedig közel 16-szorosára nő. Ebben a forgatókönyvben még a legszegényebb régiók (Afrika és a Közel-Kelet) egy főre jutó jövedelme is körülbelül 126 000 USD, ami 70 százalékkal magasabb, mint a jelenlegi amerikai egy főre jutó jövedelem (körülbelül 75 000 USD). Következésképpen ugyanazok a forgatókönyvek, amelyekben a CO₂-szint a legnagyobb mértékben növekszik, lényegében a globális szegénység is megszűnik, és ebben az esetben minden ország megengedhetné magának a szükséges étrend-kiegészítőket a mikrotápanyag-hiányok kezelésére, ha annak a szültsége felmerülne, mert nem orvosolható a mezőgazdasági stratégiákkal.

Összefoglalva, évtizedekre visszamenően bőséges bizonyítékok vannak arra, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények, így a mezőgazdasági növények számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdaságának nettó előnyt jelent. Amennyiben a tápanyagok felhígulnak, rendelkezésre állnak enyhítő stratégiák, amelyeket meg kell vizsgálni és a helyi körülményekhez kell igazítani.

Hivatkozások

- Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant physiology*, 168(16), 1909-1918.
- Bareille, F. and R. Chakir (2023) The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 119
- Blandino, M. B. (2020). Elevated CO₂ impact on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(39), 10574-10585.
- Burke, Marshall and Kyle Emerick (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy* 8(3) August 2016 106—140 <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.20130025>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>

³ Lásd az összeállítást az Our World in Data oldalon.

- CO2Science.org (undated) Plant growth archive
http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject_b.php
- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO2 concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change* 6, 786–790 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Deschênes, Olivier and Michael Greenstone (2012) The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Reply to Comment *American Economic Review*. 102, no. 7: 3761-3773. <http://hdl.handle.net/1721.1/82641>
- Ebi, Kristie L, C Leigh Anderson, Jeremy J Hess, et al. (2021) Nutritional quality of crops in a high CO2 world: an agenda for research and technology development. *Environmental Research Letters* 16(6) 064045 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfcfa>
- Köhler, Iris H., Steven C. Huber, Carl J. Bernacchi, Ivan R. Baxter (2019) Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO2 concentrations. *The Plant Journal* 97(5) 872 – 886 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tpj.14166>
- Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112.
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *The American Economic Review*, Sept 1994 753-771.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Ortiz-Bobea, Ariel (2019) The role of nonfarm influences in ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*. 102 (3), 934–959.
- Saltzman, Amy, Ekin Birol, Adewale Oparinde et al. (2017) Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. *Annals of the New York Academy of Sciences* Volume 1390, Issue 1 <https://doi.org/10.1111/nyas.13314>
- Schlenker, Wolfram and Michael Roberts (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (37) 15594-15598 <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Taylor, Charles and Wolfram Schlenker (2023) Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO2 fertilization of US field crops. *National Bureau of Economic Research Working paper* 29320, <https://www.nber.org/papers/w29320>
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, Nov. 2023, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
- Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment* 5 June 2024 <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>

Ziska, Lewis H (2022) Rising Carbon Dioxide and Global Nutrition: Evidence and Action Needed.
Plants 1(7), 1000; <https://doi.org/10.3390/plants11071000>

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

Fejet-összefoglaló

A szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit mindenekelőtt a népességnövekedés és a gazdasági növekedés határozza meg. A technológiai fejlődés, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési előírások, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Az Egyesült Államok gazdaságának bővülése enyhítette a katasztrófa költségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja. A hőséggel kapcsolatos elhalálozási kockázat az alkalmazkodási (adaptációs) intézkedéseknek (így a légkondicionálás bevezetésének) a következményeként jelentősen csökkent. Mindezek a megfizethető energia elérhetőségétől függenek. Az Egyesült Államokban az elhalálozási kockázat várhatóan még szélsőséges felmelegedési forgatókönyvek esetén sem emelkedik, amennyiben az emberek képesek a változásokhoz alkalmazkodni.

10.1 A társadalmi-gazdasági háttér

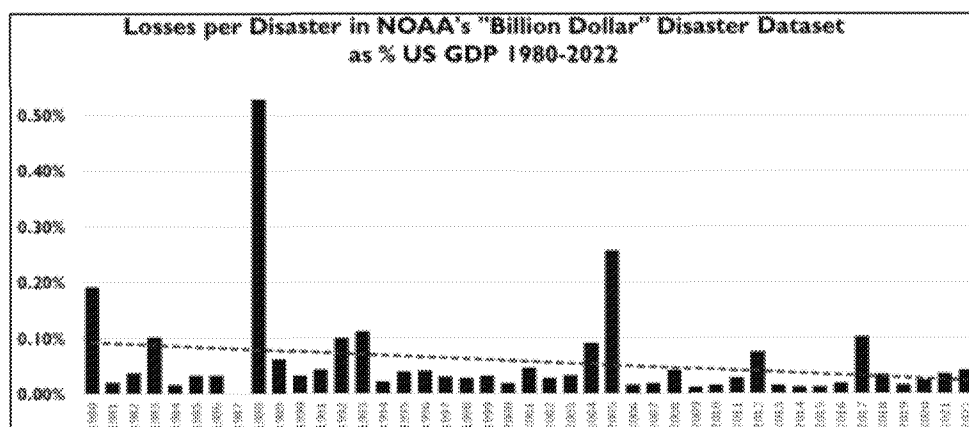
Az ember okozta éghajlatváltozás kockázatbefolyásoló tényezője a természetes időjárás és az éghajlat változékonysága. E tényezőt a part menti és az egyéb katasztrófáknak kiszolgáltatott régiók gazdagságának kitettsége, valamint a szegényebb lakosság sebezhetősége határozza meg. Az Egyesült Államokban az éghajlati kockázat alakulását társadalmi tényezők, nem pedig a tényleges időjárási és éghajlati veszélyek változásai határozták meg. Az időjárási katasztrófák okozta halálesetek száma 1900 óta jelentősen csökkent, annak ellenére, hogy az Egyesült Államok lakossága 1900-ban 76 millióról 2020-ra több mint 331 millióra nőtt (Goklany 2011). Például a galvestoni hurrikán 1900-ban több mint 8000 ember halálát okozta (az Egyesült Államok lakosságának 0,01 százaléka), míg a súlyosabb közelmúltbeli katasztrófa, a 2005-ös Katrina hurrikán csak 1800 ember halálát (vagyis az Egyesült Államok lakosságának 0,0006 százaléka) (NOAA Nemzeti Hurrikánközpont 2025; Egyesült Államok Népszámlálási Hivatala 2025).

A technológiai fejlődés jelentősen csökkentette a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A korai figyelmeztető rendszerek, a műholdas megfigyelés és a jobb időjárás-előrejelzés csökkentette a halálesetek számát, bár a pontos számokat nehéz számszerűsíteni (Deryugina és Hsiang 2023). Az amerikai időjárás-előrejelzési becslések szerint éves szinten 31,5 milliárd dolláros haszonnal csökkentik az időjárási események okozta veszteségeket, védve emberéleteket, vagyontárgyakat, valamint támogatva a mezőgazdaságot és a közlekedést (NRC 2010). A jobb hurrikán-előrejelzés csökkentette a partraszállás előtti és utáni kiadásokat, a hurrikánonkénti éves költségcsökkenés becslések szerint 5 milliárd dollár (Molina és Rudik 2024).

Az infrastrukturális fejlesztés jelentősen hozzájárult a szélsőséges időjárási események okozta veszteségek csökkentéséhez. Az építési szabályzatok, mint például a Floridában az Andrew hurrikán (1992) után bevezetett előírás, azáltal csökkentették a veszteségeket, hogy biztosították, hogy az épületek ellenálljanak a nagy szélnek és az áradásoknak. A 2002 után épült házak a Michael hurrikán (2018) alatt minimális károkat szenvedtek, ellentétben a régebbi házakkal (FEMA 2020). A tengerparti falak, mint például a Galveston tengerparti fala, védelmet nyújtanak a hullámverés és a viharhullámok ellen. A New Orleans-i hurrikán- és viharkár-kockázatsökkentő rendszer sikeresen mérsékelte a viharhullámot az Isaac hurrikán (2012) alatt (Battelle Memorial Institute 2013). Az Egyesült Államok szárazföldi gátai azáltal segítenek az áradások szabályozásában, hogy tárolják a heves esőzések során felgyülemlett felesleges vizet. A becslések szerint a Tennessee Valley Authority (TVA) gátjai a TVA régióban, valamint az Ohio és Mississippi folyók mentén körülbelül 309 millió dollár éves árvíz kárt akadályoznak meg (TVA, 2025). A Helene hurrikán (2024) során a TVA stratégiai körülbelül 406 millió dollárnyi potenciális kárt akadályoztak meg (APPA 2024).

10.2 Az adatok által jelentett kihívások

A NOAA 1980 óta közöl adatokat az Egyesült Államokban évente előforduló időjárással kapcsolatos katasztrófákról. A becslések szerint a kár meghaladta az 1 milliárd dollárt (inflációval korrigálva), és 2008-tól kezdődően jelentős növekedést mutat. A NOAA és más kormányzati tisztviselők a milliárd dollárnyi katasztrófa-sorozat (Billion Dollar Disaster) emelkedő tendenciáját említették bizonyítékként arra, hogy az éghajlatváltozás súlyosbítja a szélsőséges időjárást (Pielke Jr., 2024). Az idő múlásával azonban az Egyesült Államok népessége és vagyona drámaian megnőtt, így amikor szélsőséges időjárási vagy éghajlati esemény következik be, még akkor is nagyobb a kár, ha nincs mögöttes trend a szélsőséges időjárás gyakoriságában vagy intenzitásában. Pielke Jr. (2024) kimutatja, hogy az időjárási katasztrófákra jutó veszteségek GDP-arányosan körülbelül 80 százalékkal csökkentek 1980 óta, amint azt a 10.1. ábra is mutatja. Pielke Jr. (2024) azt is állította, hogy NOAA nem csupán áttekinthetetlen adatforrásokra és a nem bejelentett kiigazításokra támaszkodott, hanem a NOAA a milliárd dolláros katasztrófákra vonatkozó adatait sem normalizálta a lakosság kitettségének és vagyonváltozásainak megfelelően. 2025 májusában a NOAA bejelentette, hogy visszavonta a Billion Dollar Disaster („milliárd dolláros katasztrófa”) telnevezésű publikációs termékét (Pielke Jr., 2025).



10.1. ábra: Katasztrófák okozta veszteségek a bruttó hazai termék százalékában a NOAA ún. Billion Dollar Disaster (milliárd dolláros katasztrófa)-adatbázisában (2023 júliusában letöltött verzió), 1980–2022. Forrás: (Pielke, Jr. 2024)

Összefoglalva, a szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit a népességnövekedés és a gazdasági növekedés uralja. A technológiai fejlesztések, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek, jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési szabályzatok, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Végül az Egyesült Államok gazdaságának bővülése felhívította a katasztrófa költségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja.

10.3 Halálozás a hőmérsékleti szélsőségek miatt

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

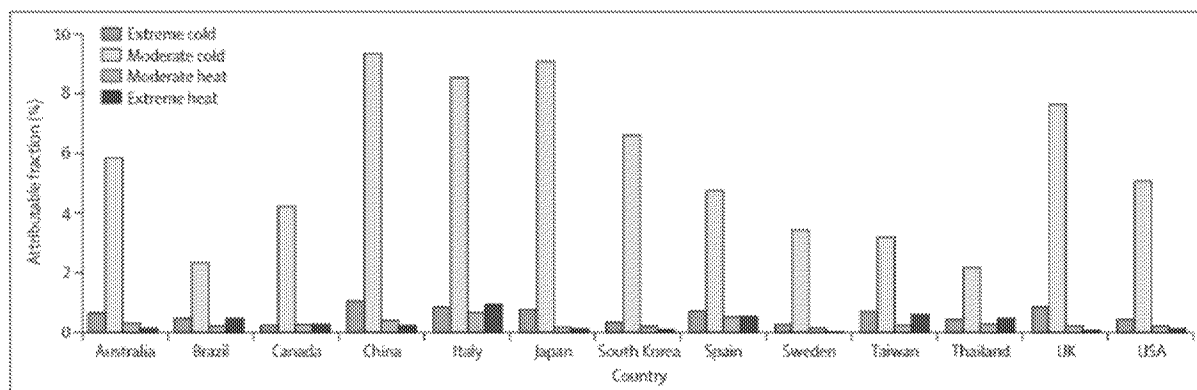
A hőmérsékleti szélsőségek változásai a legbiztosabb hatások közé tartoznak, amelyek várhatóan egy felmelegedő világban várhatóak. Logikus, hogy a szélsőséges hőség eseményei valószínűleg gyakoribbá válnak, míg a szélsőséges hideg események ritkábbá. Ez a mintázat a

történelmi időszakban nyilvánvaló, és a további felmelegedéssel várhatóan folytatódni fog, bár nem az Egyesült Államok kontinentális részén (6. fejezet),

Hőségek idején a halálozást jellemzően hőséguta és hőkimerültség okozza, míg hideg szélsőségek idején a halálozás jellemzően a hipotermiából és a szív megterheléséből fakad. A globális halálozási arány hideg körülmények között lényegesen magasabb, mint melegben (Zhao et al. 2021, Ritchie 2024). A hőséggel összefüggő halálozással ellentétben a hideg időjárás kockázatai már mérsékelt hideg körülmények között is fennállnak (Gasparini et al. 2015, Lee és Dessler 2023). Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) (a Betegségellenőrzési és Megelőzési Központok adataira hivatkozva) arról számol be, hogy 1999 és 2015 között átlagosan 2,2 haláleset történt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hideg volt a fő kiváltó ok, és további 2,4 haláleset egymillió amerikaira vetítve, amelyeknél a hideg közrejátszott (EPA 2025). Ezzel szemben 1,3 haláleset volt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hőség volt a fő ok, és további 0,8 haláleset egymillió emberre vetítve, amelyeknél a hőség közrejátszott. Ezzel a mutatóval mérve a hideg körülbelül kétszer annyi időjárással összefüggő halálesetért felelős, mint a hőség.

Azok az epidemiológiai módszerek, amelyek a korrelációs bizonyítékokat – nem csak a halotti anyakönyvi kivonatokat – veszik figyelembe, azt mutatják, hogy a hideg/meleg arány sokkal magasabb lehet. Egy 13 országban végzett, 1985 és 2012 között 74 millió halálesetet felölelő tanulmány becslése szerint a halálesetek átlagosan 7,7 százaléka az optimális tartományon kívüli hőmérsékletnek volt tulajdonítható, ebből 7,4 százalék a hidegnek, és csak 0,4 százalék a melegnek (Gasparini et al. 2015). Más szóval, a hideg időjárás 18,5-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.

A 10.2. ábra Gasparini et al. (2015) eredményeinek országonkénti eloszlását mutatja. Az Egyesült Államokban a hőmérsékletnek tulajdonítható halálesetek aránya 5,9 százalék, ebből 5,5 százalék a hidegre vezethető vissza, így a hideg időjárás 14-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.



10.2. ábra: A szélsőséges és mérsékelt hidegnek és melegnek tulajdonítható halálozások országonként. Forrás: Gasparini et al. (2015) alapján reprodukálva.

Erős bizonyítékok léteznek arra, hogy az emberek alkalmazkodnak az időjárási kockázatokhoz. Lee és Dessler (2023) arról számoltak be, hogy az Egyesült Államok 40 városában a hőmérséklettel összefüggő halálesetek 86 százaléka a hideggel összefüggő halálozásnak volt köszönhető, és hogy az évszakos hőmérséklet emelkedésével az alkalmazkodás miatt a halálozás relatív kockázata mind a meleg, mind a hideg városokban csökkent. Allen és Sheridan (2018) megállapították, hogy a rövid, éveleji hideg események 2-5-ször halálosabbak, mint a meleg események, de mind a hideg, mind a meleg szélsőségek halálozási kockázata közel nullára csökken, ha az események a hideg évszak végén következnek be.

Davis et al. (2003) 28 amerikai városban vizsgálta a hőséggel összefüggő halálozást az 1960-as évektől az 1990-es évek végéig, és azt találták, hogy a mintavételi időszakban a hővel összefüggő elhalálozás háromnegyedével csökkent. Bobb et al. (2014) több mint 100 amerikai város 106 millió lakosának elhalálozási adatait vizsgálta, és azt találta, hogy az 1987 és 2005 közötti időszakban az

átlagos hőség okozta halálozás 60 százalékkal csökkent, 51 ezrelékes halálesetről 19-re. Azt is kimutatták, hogy a legnagyobb csökkenés a 75 év feletti idősök körében következett be. Egy 211 amerikai városban 1962 és 2006 között bekövetkezett 42 millió halálesetet vizsgáló tanulmányban Nordio et al. (2015) a túlzott hőség okozta halálozás kockázatában több mint 90 százalékos csökkenést találtak.

A hőség okozta halálozás jelentős csökkenésével összefüggésben a hőmérséklet emelkedése nettó életmentést jelent, mivel csökkenti a hideg események által okozott halálesetek számát. Az AR6 Munkacsoport 2. fejezetének 16.2.3.5. fejezete (O'Neill et al. 2022) elismeri, hogy a hőség okozta halálozási kockázat idővel csökken:

A hőségnek tulajdonítható elhalálozási arányok a legtöbb országban az idők során csökkentek az egészségügyi rendszerek általános javulása, a lakossági légkondicionálás növekvő elterjedtsége és a viselkedésbeli változások miatt. E tényezők határozzák meg a lakosság hőérzékenységet, túlsúlyba kerülve a hőmérsékletváltozás hatásával szemben.

Az IPCC az AR6 Összefoglaló jelentésében mégis félreértelmezi az általános helyzetet. A dokumentum A.2.5. szakasza kimondja: „A szélsőséges hőség eseményeinek növekedése minden régióban emberi halálozáshoz és megbetegedéshez vezetett (*nagyon magas megbízhatóság*).” De hallgat arról, hogy a szélsőséges hideg események során a halálesetek száma nagyobb mértékben csökkent.

Az Egyesült Államokban megfigyelt hőséggel összefüggő elhalálozási arány-csökkenést kifejezetten az alkalmazkodásnak tulajdonították. Wang et al. (2018) 209 amerikai városban vizsgálta meg a hőhullámokkal összefüggő elhalálozási arány térbeli változékonyságát 1962 és 2006 között. Míg az egyszerű korreláció a hőhullámok alatti halálozási kockázat növekedését sugallta, a hőhullám intenzitásához való alkalmazkodás figyelembevétele azt eredményezte, hogy a hatás közel nullára esett, és statisztikailag jelentéktelenné vált. Epidemiológiai modelljük eredményeit felhasználva a hőséggel összefüggő halálozási arányt négy RCP felmelegedési forgatókönyv (köztük az RCP8.5) szerint (adaptív viselkedéssel és anélkül) 2050-ig kivetítették. Feltételezték, hogy az emberek továbbra is alkalmazkodnak a hőhullám-kockázathoz azokban a régiókban, ahol élnek. Wang et al. (2018) az Egyesült Államokban nemcsak a hőséggel összefüggő halálozások növekedését vetíti előre, hanem az általános halálozási arány csökkenését is. Arra a következtetésre jutottak, hogy

„Az alkalmazkodás figyelmen kívül hagyása a hőhullámokkal kapcsolatos jövőbeli elhalálozási arány jelentős túlbecsléséhez vezetne... Az alkalmazkodást figyelembe véve a hőséggel összefüggő teljes elhalálozási arány 2050-re idővel nem változna jelentősen a 2006-os szinthez képest.”

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

Egy 2016-os, az Egyesült Államokban a hőmérséklet-ingadozásokkal összefüggő hosszú távú elhalálozási kockázatokról szóló tanulmány (Barreca et al. 2016) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban az elhalálozási arány növekedése összefügg mind a hideg, mind a meleg időjárással. Idővel azonban az áram bevezetése, valamint a központi fűtés és a légkondicionálás (AC) elterjedése drámaian csökkentette mindkét kockázatot, különösen a meleg időjárással összefüggő kockázatokat. 1960 előtt egy 32°C feletti nap 2,2 százalékkal növelte az átlagos elhalálozási kockázati arányt, de 1960 után ugyanez az időjárás csak 0,3 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, ami 85 százalékos csökkenést jelent. 1960 előtt a 4°C (39°F) alatti hőmérséklet körülbelül 1 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, de 1960 után ugyanez az időjárás e számnak csak körülbelül a felét tette ki. A hagyományos háztartási fejlesztéseken keresztüli alkalmazkodás drámaian csökkentette a lakosság kiszolgáltatottságát az időjárási szélsőségekkel szemben. A meleg időjárás miatti elhalálozás

teljes csökkenése a beltéri légkondicionálók széles körű elterjedésének volt betudható, ami a megbízható és megfizethető áram elérhetőségétől függ.

Ennek a megállapításnak a következménye, hogy a fűtési és a hűtési rendszerek használata az energia megfizethetőségétől függ. Doremus et al. (2022) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban a gazdag és a szegény háztartások hasonló ütemben igazítják energiakiadásait a mérsékelt hőmérséklet-ingadozásokra, de nem a szélsőséges hőmérséklet-ingadozásokra. Amikor a hőmérséklet nagyon hideg szintre ($< 5^{\circ}\text{C}$) ingadozik, a magas jövedelmű háztartások energiakiadásai 1,2 százalékkal, az alacsony jövedelmű háztartásokéi pedig csak 0,5 százalékkal nőnek. Nagyon forró napokon ($>30^{\circ}\text{C}$) a magas jövedelmű háztartások áramkiadásai 0,5 százalékkal nőnek, míg az alacsony jövedelmű háztartásokéiban egyáltalán nem változnak. Ez utóbbi eredmény még azokban az almintákban is megfigyelhető, ahol minden háztartásban van légkondicionáló. Cong et al. (2022) hasonló eredményekről számoltak be egy arizonai háztartásokból álló mintán. Mindez azt mutatja, hogy a fűtési és hűtési rendszerek széles körű elterjedése ellenére az energia megfizethetlensége következtében az alacsony jövedelmű háztartások ki vannak téve az időjárási szélsőségeknek.

Hivatkozások

- Allen, M.J. and S.C. Sheridan (2018) Mortality risks during extreme temperature events (ETEs) using a distributed lag non-linear model. (2018) *International Journal of Biometeorology* 62, 57–67 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1117-4>
- American Public Power Association. (APPA, 2024, March 7). TVA flood mitigation strategies prevented approximately \$406 million in potential damages. Public Power Current. <https://www.publicpower.org/periodical/article/tva-flood-mitigation-strategies-prevented-approximately-406-million-potential-damages>
- Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro (2016), Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century, *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 105–159.
- Battelle Memorial Institute. (2013, December). Final independent external peer review report: Hurricane Isaac (2012) assessment (Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans District). <https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/PeerReview/TCN13-003HurrIsaacAssessIEPRFinal.pdf>
- Bobb JF, RD Peng, ML Bell and F Dominici (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* 122:811–816; <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392>
- Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications* 13, 2456 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
- Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” *Environmental Health Perspectives* 111(14) November 2003 pp. 1712—1718 <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.6336>
- Deryugina, T., & Hsiang, S. M. (2023). Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States (NBER Working Paper No. 31361). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w31361>
- Doremus, JM, I. Jacqz and S. Johnston (2022), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” *Journal of Environmental Economics and Management*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102609> .
- Environmental Protection Agency (2025) Climate Change Indicators. <https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators>

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020, February 13). The role of Florida's building codes in Hurricane Michael recovery. <https://www.fema.gov/case-study/role-floridas-building-codes-2018-hurricane-michael>
- Gasparini, A., Y. Guo, M. Hashizume et al. (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet* 386: 369-385 July 25, 2015 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Goklany, I. M. (2011). Deaths from extreme weather events, 1900–2010. Reason Foundation. https://a8d50b36.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2011/09/deaths_from_extreme_weather_1900_2010.pdf
- Lee, Jangho and Andrew Dessler (2023) Future Temperature-Related Deaths in the U.S.: The Impact of Climate Change, Demographics, and Adaptation. *GeoHealth* 7(8) August 2023 <https://doi.org/10.1029/2023GH000799>
- Molina, R and I Rudik (2024) The value of improving hurricane forecasts. National Bureau of Economic Research Working Paper 32548 June 2024. <https://www.nber.org/digest/202409/value-improving-hurricane-forecasts>
- National Hurricane Center. (n.d.). Costliest U.S. tropical cyclones tables updated. NOAA National Hurricane Center. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/>
- National Research Council. (2010). Adapting to the impacts of climate change. The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/12888/chapter/2>
- Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). “Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change” *Environment International* Volume 81, pp 80-86 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009>.
- O'Neill, B., et al. (2022). Key risks across sectors and regions. In AR6 Working Group II Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2411–2538). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch
- Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. *npj Natural Hazards*, 1, Article 12. <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0>
- Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. *The Honest Broker* [Substack]. <https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters>
- Ritchie, H. (2024). How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>
- Tennessee Valley Authority (TVA). (n.d.). Flood management. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.tva.com/environment/managing-the-river/flood-management>
- U.S. Census Bureau. (n.d.). Decennial census by decade. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census/decade.html>
- Wang, Yan, Francesco Nordio, John Nairn, Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) “Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality” *Environmental Research* 161 pp. 464—471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049>
- Zhao, Q., et al. (2021). Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(7). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4)

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

Fejezet-összefoglaló

A közgazdászok a gazdasági növekedés szempontjából az éghajlatot már régóta viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják, e nézetet maga az IPCC is megerősíti az AR5-ben. A üfösodratú klímagazdaságtan felismerte, hogy a CO₂ miatti felmelegedésnek ugyan lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik az agresszív csökkentési szakpolitika indoklásához, és hogy a globális felmelegedés „megállítása” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szint esetén is nagyobb kárt okozna, mintha nem tennénk semmit sem. Egy 2012-es nagy visszhangot kiváltó tanulmány megállapítása szerint a globális felmelegedés káros hatással lenne a szegény országok növekedésére, de e megállapítás később nem bizonyult megalapozottnak. A modellezési bizonytalanságokat teljes mértékben figyelembe vevő tanulmányok vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására vonatkozólag, vagy arra a következtetésre jutnak, hogy a szegény országokra ugyanúgy a javukra szolgál, mint a gazdagoknak.

A szén-dioxid (a „karbon”) társadalmi költségére (SCC) vonatkozó becslés a jövőbeli gazdasági növekedés, a társadalmi-gazdasági folyamatok, a kamatlábak, az éghajlati károk és a rendszerreakciók ismeretlen tényezői miatt rendkívül bizonytalan. Az SCC nem mond semmiféle érdemi információt a klímaváltozás gazdasági vagy társadalmi hatásairól. Egy olyan indexet szolgáltat, amely az éghajlattal és a gazdasággal kapcsolatos feltételezések nagy hálózatait dollárértékekkel köti össze. Egyes feltételezésekből magas SCC-re következtetnek, míg másokból alacsony vagy negatív SCC adódik (azaz a kibocsátás társadalmilag hasznos). A kiindulási feltételezések melletti vagy elleni bizonyítékokat függetlenül kell megállapítani; az így kapott SCC semmiféle további információt nem ad e feltételezések érvényességéről. Billenőpontok lehetőségének figyelembevétele nem indokolja az SCC-becslések jelentős módosítását.

11.1 Klímaváltozás és gazdasági növekedés

11.1.1 Áttekintés

Régi megfigyelés, hogy a gazdaságok általában rosszul teljesítenek a nagyon hideg és a nagyon meleg régiókban, az optimum valahol a kettő között van (Nordhaus, 2006). Ez azt jelenti, hogy a felmelegedés káros lesz a forró régiókban, de előnyös a hidegekben. A hőmérséklet-érzékeny gazdasági tevékenység, amikor csak lehetséges, a legmegfelelőbb helyre vándorol, ahol a társadalom alkalmazkodik a helyi éghajlathoz. Részben ezekre a megfigyelésekre alapozva, 1992-ben Thomas Schelling, az Amerikai Gazdasági Társaság akkori elnöke azzal érvelt, hogy az éghajlatváltozásnak az Egyesült Államok gazdasági tevékenységére gyakorolt hatásai csekélyek lennének a sok más változáshoz képest, amelyek bekövetkeznének (Schelling 1992).

... A gyártás ritkán függ az éghajlattól, és ahol korábban a hőmérséklet és a páratartalom befolyásolta a helyzetet, a légkondicionálás közbelépett. Amikor a Toyota Ohio, Alabama és Dél-Kalifornia közül választja ki egy autószerelő üzem helyszínét, a földrajzi szempontok fontosak, de nem az éghajlat miatt... A pénzügyeket kevésbé befolyásolja az éghajlat; hasonlóan az egészségügyhöz, az oktatáshoz vagy a műsorszóráshoz. A közlekedést befolyásolhatja, de az elmúlt 30 évben a minden időjárási körülmény között elérhető leszállás és felszállás terén elért fejlesztések nagyobbak, mint az éghajlat által okozott bármilyen különbség. Ha az átlagos hatás felmelegedés, a jeges vízi utak és a hóeltakarítás jelentősége csökkenhet.

Az építőiparra hatással van, főként a hideg, és ha az átlagos hatás a felmelegedés irányába mutat, abból az építőipar kismértékben profitálhat.

A változás valójában a mezőgazdaságot érinti. De még ha a mezőgazdasági termelékenység a következő fél évszázadban egyharmaddal is csökkenne, az egy főre jutó GNP-t, amelyet 2050-re elérhettünk volna, csak 2051-ben érnénk el. ...

Arra a következtetésre jutottam, hogy az Egyesült Államokban, és valószínűleg Japánban, Nyugat-Európában és más fejlett országokban a gazdasági teljesítményre gyakorolt hatás elhanyagolható lesz, és valószínűleg észre sem fogjuk venni.

Harminc évvel később maga az IPCC is gyakorlatilag ugyanezt a megállapítást tette az ötödik értékelő jelentésében (Arent et al. 2014, kiemelés tőlem).

A legtöbb gazdasági ágazatban az éghajlatváltozás hatása csekély lesz más tényezők hatásaihoz képest. A népesség, az életkor, a jövedelem, a technológia, a relatív árak, az életmód, a szabályozás, a kormányzás és a társadalmi-gazdasági fejlődés számos egyéb oldalának változása a gazdasági árak és szolgáltatások kínálatára és keresletére olyan mértékben fog hatással lenni, amely nagyban meghaladja az éghajlatváltozás hatását.

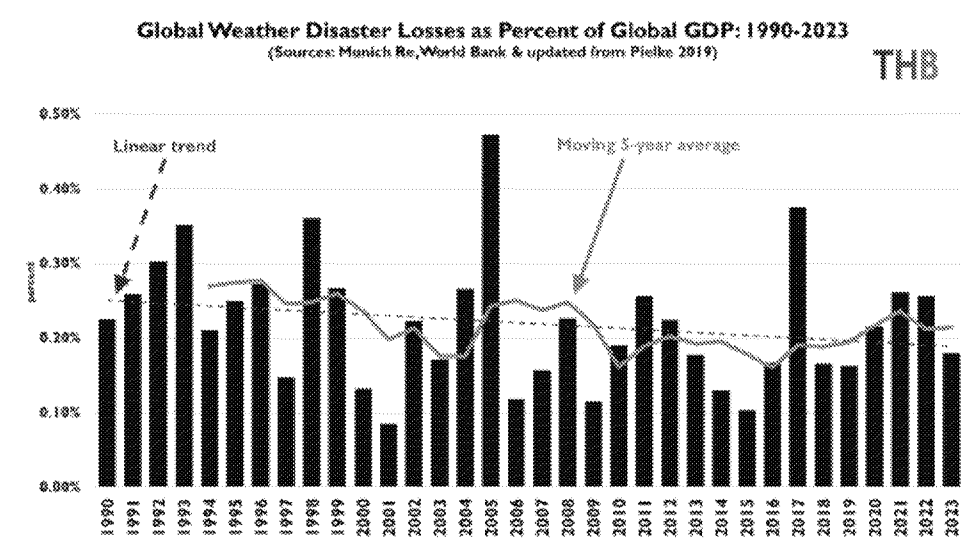
Az AR5 óta felhalmozott bizonyítékok nem változtatnak ezen az értékelésen. Mohaddes et al. (2023) megállapították, hogy a meleg időjárási sokkok kismértékben negatív hatással vannak az Egyesült Államok államszintű termelésére, de nem a jövedelemre, míg a hideg időjárási sokkok mindkettőre negatív hatással vannak, és a hatások körülbelül négyszer nagyobbak, ami azt jelenti, hogy a melegebb körülményekre való áttérés összességében nettó gazdasági hasznot hozna az Egyesült Államok számára.

Ezeket az állításokat a tapasztalatok is alátámasztják. 1900 óta az átlagos globális felszíni hőmérsékleti anomália 1,3°C-kal emelkedett, ami körülbelül annyi, amennyit az IPCC a következő évszázadban mérsékelt kibocsátási forgatókönyv szerint előre jelez. De ugyanakkor, amikor a Föld melegedett, és a népesség ötszörösére nőtt, az emberiség soha nem látott mértékben kezdett virágozni. Például a globális átlagos élettartam harminckét évről hetvenkét évre nőtt, az egy főre jutó gazdasági aktivitás hétszörösére nőtt, a szélsőséges időjárási események által okozott elhalálozási arány pedig ötvenszörösére zuhant. Az éghajlatváltozás miatti kárelőrejelzések jellemzően arról szólnak, hogy az emberiség életkörülményei mennyivel javulnak, és nem állítják azt, hogy abszolút értelemben rosszabb lesz (O'Neill 2023).

Bár a szélsőséges időjárási események költségesek, minden modern gazdaságban egyre kevésbé fontosak (Formetta és Feyen, 2019). 1990 óta az időjárással kapcsolatos katasztrófaveszteségek a globális GDP-hez viszonyítva csökkentek (Pielke Jr, 2018, 2020), akárcsak az elhalálozási kockázatok (Formetta és Feyen, 2019). A gazdasági időjárással kapcsolatos biztosítási kifizetések ugyan emelkednek, de ezt teljes mértékben magyarázza a gazdaság méretének és a biztosított eszközállomány értékének növekedése. A szélsőséges időjárási események számának korábbi növekedése nem gyakorolt jelentős (pozitív vagy negatív) hatást a biztosítótársaságok piaci értékére (Hu és McKittrick, 2015). A múltbeli szélsőséges időjárási eseményeknek sem volt jelentős hatásuk az amerikai bankok teljesítményére (Blickle et al., 2021); sőt, a felmelegedésről kimutatták, hogy a pénzügyi és biztosítási szektor számára előnyös (Mohaddes et al., 2023). Az alábbi 11.1. ábra szemléltető jellegű. Ezen okok miatt a közgazdászok régóta vonakodnak támogatni az éghajlatváltozás „megállítására” vagy akár az üvegházgáz-kibocsátás agresszív csökkentésére irányuló kísérleteket, mert a költségek nem érnék meg. Ahogy a klímapolitika közgazdaságtanának egyik kritikusa fogalmazott (Storm 2017):

A mainstream klímagazdaságtan komolyan veszi a globális felmelegedést, de zavarba ejtő módon arra a következtetésre jut, hogy az optimális gazdaságpolitika az, ha szinte semmit

sem teszünk ellene... A kontraszt feltűnő. Míg a klímatudomány hangos és világos üzeneteket küld arról, hogy a fosszilis tüzelőanyagok kivonását most kell elkezdni, le kell mondani a szénről és az olajról, és az erőforrásokat megújuló energiaforrásokból működő technológiai rendszerek felé kell irányítani, hogy a felmelegedést a 2°C-os határérték alatt tartsuk (IPCC 2014), a mainstream klímagazdaságtan azt állítja, hogy a túlságosan ambiciózus klímacélok szükségtelenül károsítják a gazdaságot, és az azonnali dekarbonizáció túl drága. A legtöbb klímagazdaságtan-szakértő ezért azt javasolja az emberiségnek, hogy csak várjon és figyeljen.



11.1. ábra: A globális időjárási veszteségek a GDP arányában. Forrás: Pielke Jr. (2023)

A mainstream közgazdaságtan álláspontját a klímapolitikai kérdésben legjobban az elmúlt három évtized integrált értékelési modelljeinek (IAM) az éghajlatváltozási politikával kapcsolatos eredményei képviselik, amelyekért William Nordhaus, a Yale Egyetem közgazdásza 2018-ban közgazdasági Nobel-éremet kapott. Az IAM-ek (invazív integrált klímamodellek) az éghajlati károk szimulálásának és az optimális politikai válasz értékelésének céljából gazdasági, éghajlati és társadalmi adatokat egyesít egységes keretrendszerbe (Resources for the Future, 2025). Nordhaus munkája általánosságban a mérsékelt globális klímapolitikát támogatta, az agresszív intézkedéseket nagyrészt a század végére halasztották. Nordhaus az 1990-es évek elején fejlesztette ki az úgynevezett Dinamikus Integrált Klíma- és Gazdaságmodellt (DICE) (Nordhaus, 1993), annak érdekében, hogy hosszú távon tanulmányozhassa a klímaváltozás, a klímapolitika és a globális gazdasági növekedés közötti kölcsönhatást. A DICE feltételezi, hogy a globális kibocsátás-szabályozás költségmentesen koordinálható, és azt a kérdést teszi fel, hogy mi legyen az optimális politikai cél. A DICE modell éghajlati komponense egyszerűsített klimatológiai modellezésen alapul. A DICE modell Nordhaus Nobel-díjjal való elismerése idején érvényes verzióját Nordhaus (2018) írta le; a CO₂-megduplázódás éghajlati érzékenységi paramétere 3,1°C volt, ami összhangban van az IPCC-jelentésekben szereplő legjobb becsléssel (3,0°C).

Az alap (klímapolitika nélküli) forgatókönyv mindössze 0,4 billió (T, trillion) dolláros globális kibocsátáscsökkentési költséggel jár, és 134,2 billió (trillion) dolláros globális klímakárt okoz, ami összesen 134,6 billió dolláros költséget jelent. A DICE klímamodel-komponense 2100-ra 4,1°C-os felmelegedést vetít előre az iparosodás előtti hőmérsékletekhez képest. Megjegyzendő, hogy ez becsült felmelegedés magasabb, mint számos IPCC klímamodellel.

Az optimális szakpolitikai forgatókönyv alig tér el a szokásos üzletmenet útjától. +3,5°C-os felmelegedést céloz meg, más szóval a fosszilis tüzelőanyagok használatát mérsékeltten csökkentjük, és egyébként csupán együtt élünk szinte a teljes felmelegedéssel. Ez arra utal, hogy a CO₂-kibocsátás

nagy része kevésbé káros, mint azok a politikák, amelyek a mérsékléséhez szükségesek lennének. A felmelegedés megakadályozására tett kísérletek költségei hamar meghaladják az előnyöket. A felmelegedés 2,5°C-ra korlátozásának célkitűzése 177,8 billió dolláros összköltséget ad ki, ami 43,2 billió dollárral rosszabb, mintha semmit sem tennénk. Nordhaus nem értékelte a párizsi megállapodáshoz hasonló 1,5°C-os felmelegedési cél elérését, de az még költségesebb lenne.

A DICE későbbi kiadása a felmelegedésből eredő feltételezett károkat magasabb szinten veszi figyelembe, ami nem meglepő módon agresszívabb politikai ajánlásokhoz vezet, amint azt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségéről szóló alábbi szakaszban kifejtjük.

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adatalapú elemzése

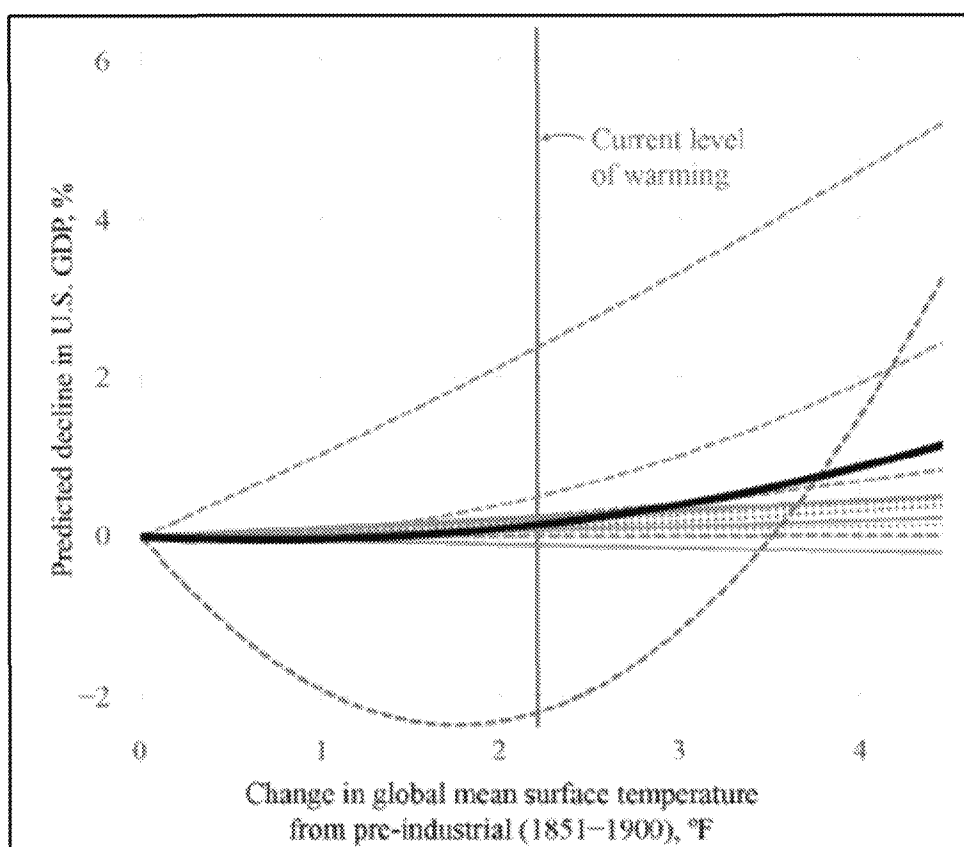
Számos más tanulmány éghajlatváltozás gazdasági növekedésre gyakorolt potenciális hatásának vizsgálatára az IAM-ek helyett atörténeti adatokra alkalmazott ökonometriai módszereket használt az. Dell et al. (2012, a továbbiakban DJO12) egy nagyhatású tanulmány volt, ami egy több országra és a 1950 és 2005 közötti időszakra kiterjedő, nemzeti szintű adatokból álló panelt használt, amelyben az éghajlati és gazdasági adatokat a helyi rácscellák szintjétől a nemzeti szintig terjedő hőmérséklet átlagolásával párosították össze népességi súlyok segítségével. Azt találták, hogy a felmelegedés a gazdag országokban jelentéktelen pozitív hatással van a jövedelemnövekedésre, de a szegény országokban jelentős negatív hatással jár. Moore és Diaz (2015) módosították a DICE modellt, hogy figyelembe vegyék ezt a megállapítást, és arra a következtetésre jutottak, hogy a jövedelemkiesés időbeli összetett hatásai miatt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költsége drámaian magasabb értékét jelenti.

A későbbi nagyszámú szakirodalom vitatta a DJO12 megállapításainak robusztusságát. Burke et al. (2015) egy olyan globális panelt elemzett, amelynek átlaghőmérsékletei országos szintre voltak átlagolva, és azt találták, hogy a felmelegedés negatív hatással van a növekedésre mind a gazdag, mind a szegény országokban, amikor az országos átlaghőmérséklet meghaladja a 13°C-ot. Zhao et al. (2018) Nordhaus (2006) G-Econ adatkészletét használta, ami a gazdasági aktivitást rácscella-szintre bontja le, és a DJO12-típusú eredményeket ugyanazon az országcsoporton ismételték meg, mint amilyeneket a DJO12-ben használtak, de ezután kimutatták, hogy a teljes globális mintán a felmelegedés mind a gazdag, mind a szegény országokban fokozza a növekedést, bár az utóbbi csoportban a pozitív hatás ott jelentkezik, ahol a helyi hőmérséklet körülbelül 16°C alatt marad. Greßer et al. (2021) egy regionális gazdasági adatkészletet fejlesztettek ki a világ 1542 szubnacionális régiójára vonatkozóan a 2005 és 2015 közötti időszakra, és azt találták, hogy a hőmérsékletnek nincs hatása a növekedésre. Yang et al. (2023) frissítette a DJO12 adathalmazt, és a mintavételi gyakoriság vegyeslégével szemben robusztusan viselkedő becslőt alkalmazott. Megállapították hogy bár a hőmérsékleti sokkok a jövedelmi szintre átmenetileg hatást gyakorolnak, a növekedési ütemre nézve nem volt jelentős és tartós következmény.

Newell et al. (2021) megjegyezte, hogy a szakirodalomban nincs olyan mögöttes elmélet, amely az ökonometriai modellspecifikációt irányítaná. Figyelembe véve a magyarázó változók önkényes megválasztását, több mint 800 lehetséges modellspecifikációt azonosítottak. Burke et al. (2015) adatait felhasználva egy olyan becslési módszert alkalmaztak, amely figyelembe veszi a modell bizonytalanságát, és megállapították, hogy a Burke et al. (2015) által preferált modellformát (ami a növekedésre nézve még a gazdag országokban is felmelegedés negatív hatásait sugallta), az optimális modellkiválasztási algoritmus kifejezetten kizárja. Összességében nem tudtak kimutatni a GDP-re vagy a GDP-növekedésre gyakorolt hőmérsékleti hatást. A globális növekedésre gyakorolt hatás 95%-os konfidenciaintervallumát 2011-ra a túlzó RCP8.5 felmelegedési forgatókönyv szerint is -86 százaléktól +388 százalékig terjedően becsülték. Más szóval, a nettó hatás valószínűleg pozitív, de túl bizonytalan ahhoz, hogy megkülönböztethető legyen a nullától.

Barker (2023) bírálta azon DJO12-feltételezést, hogy az országokat évtizedekkel ezelőtti jövedelmük alapján rögzített „szegény” és „gazdag” kategóriákba lehet csoportosítani. Megjegyezte, hogy sok ország egykor szegény volt, de idővel meggazdagodott, és ha ezt figyelembe vesszük, a Dell et al. által jelentett eredeti hőmérsékleti hatások kicsivé és jelentéktelenné váltak.

Berg et al. (2023) azzal érvelt, hogy az országokat nem szabad nagyvonalúan gazdag/szegény kategóriákba csoportosítani, mert túl heterogének. Ehelyett országspecifikus hőmérsékleti válaszreakciók együtthatókat becsültek meg, majd a hasonló válaszreakciók együtthatókkal rendelkező országokat kis panelekbe csoportosították. Külön becsülték meg a globális és az egyedileg jellemző helyi hőmérsékleti sokkokra adott válaszokat, hogy jobban azonosítsák az éghajlati jelet az időjárási adatokban. Összességében azt találták, hogy a felmelegedés növekedésre gyakorolt negatív hatását tapasztaló országok száma meghaladta a pozitív hatásokat tapasztalókat, de csak átmenetileg: a hatások végül megfordulnak, így körülbelül kétszer annyi ország tapasztal nettó pozitív növekedési hatást. Azt is megállapították, hogy sokkal valószínűbb, hogy a globális hőmérséklet-változások (szemben a helyiekkel) inkább a szegény országok növekedését segítik elő, mint a gazdagokét. Egy 2100-ig tartó szimulációban, még a szélsőséges RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazva is, kiszámolták, hogy az átlagos globális GDP-veszteség csak 1,9 százalék lenne a felmelegedés nélküli forgatókönyvhöz képest. Vagyis a gazdaság 400 százalékos növekedése helyett 392 százalékkal növekedne. Nordhaus korábbi elemzésének következménye, hogy a felmelegedés megakadályozására tett kísérletek jóval kevesebb, mint 392 százalékos növekedéshez vezetnének. Összefoglalva, a közgazdászok a klímát viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják a gazdasági növekedésben, ezt a nézetet maga az IPCC is megerősíti az ötödik értékelő jelentésében. A klímagazdaságtan főáramlatai felismerték, hogy a CO₂ által okozott felmelegedésnek lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik ahhoz, hogy az agresszív csökkentési politikát igazolni lehessen, és a globális felmelegedés „megállítására” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szinten is rosszabb lenne, mint a semmittevés. Egy nagyhatású 2012-es tanulmány azt sugallta, hogy a globális felmelegedés károsítaná a szegény országok növekedését, de a megállapítás később nem bizonyult megbízhatónak (Tol 2024). Azok a tanulmányok, amelyek teljes mértékben figyelembe veszik a modellezési bizonytalanságokat, vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására, vagy úgy találják, hogy a szegény országok ugyanolyan valószínűséggel profitálnak belőle, mint a gazdag országok.



11.2. ábra: Az Egyesült Államok GDP-jének csökkenése a felmelegedés foka szerint. Forrás: CEA-OMB (2023)

A Biden-kormányzat csendben tudomásul vette azt a várakozást, hogy a jelentős globális felmelegedés kis hatással lesz az amerikai gazdaságra, még akkor is, amikor az elnök klímavészhelyzetet hirdetett. A 2023-as CEA-OMB jelentésből származó 11.2. ábra az amerikai GDP várható csökkenését mutatja a hőmérséklet-emelkedés függvényében. A színes vonalak egy tucatnyi lektorált publikált tanulmány eredményeit mutatják, míg a folytonos fekete vonal ezek átlagát. Az adatot úgy lehetne összefoglalni, hogy „néhány százalékos hatás néhány fokos felmelegedés esetén”. Tekintettel arra, hogy a gazdaság éves növekedési üteme várhatóan 1-2 százalék lesz, a melegedő földgömb hatása az amerikai GDP-re valóban elhanyagolható.

11.2 Modellek a szén-dioxid társadalmi költségére (SCC)

A szén-dioxid társadalmi költsége (SCC) a szén-dioxid-kibocsátás gazdasági hatásának számszerűsítésére használt eszköz, amely segít a politikai döntéshozóknak mérlegelni a klímapolitikák költségeit és előnyeit. Becslést ad arra a kárra, amit egy tonna CO₂ többlet kibocsátása okoz, dollárban kifejezve. Formálisabban fogalmazva, az SCC a légkörbe jutó további CO₂-mennyiség miatti jelenlegi és jövőbeli gazdasági jóléti marginális veszteség diszkontált jelenértéke.

11.2.1 Az SCC becslése

Bár a szakirodalom az SCC „becsléseire” hivatkozik, azt nem úgy becsülik meg, ahogyan más gazdasági statisztikákat becsülnék. Például a piaci tranzakciókra vonatkozó adatok, beleértve az árakat és a mennyiségeket, felhasználhatók a jelenlegi inflációs ráta vagy az egy főre jutó reál GDP növekedési ütemének becslésére, és ezekhez a mennyiségekhez jól ismert bizonytalanságok tartoznak.

De nincsenek olyan piaci adatok, amelyekkel mérni lehetne a CO₂-kibocsátással feltételezett marginális károk vagy előnyök nagy részét (a legtöbbjét), ezért ezeket gazdasági modellek segítségével kell figyelembe venni.

Például egyes SCC-számítások befolyásoló eleme a szélsőséges időjárás miatti jövőbeni halálozási kockázat változásával járó észlelt társadalmi költség. Nincs olyan piac, ahol az emberek közvetlen árat rendelhetnének ehhez a kockázathoz. A közgazdászok legjobb esetben is megpróbálhatják kikövetkeztetni ezeket az értékeket a kapcsolódó piacokon, például ingatlanpiacon vagy biztosításokon lebonyolított tranzakciók vizsgálatával, de az árváltozásoknak és a légköri CO₂-szintnek tulajdonítható hatások elkülönítése nagyon nehéz.

A közgazdászok az SCC-t IAM-mal (integrált értékelési modellekkel) számítják ki. A két legismertebb a Bizonytalanság, Negatívum és Elosztás Éghajlati Keretrendszer (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution, „FUND”, Tol 1997) és Nordhaus DICE modellje. Az EPA (2023) újabban továbbiakat vezetett be. Az IAM-ek egy „kárfüggvényt” vagy függvénykészletet ágyaznak be, amely a környezeti hőmérsékletet hozzákapcsolja a helyi gazdasági viszonyokhoz. A kárfüggvénybe ágyazott feltételezések nagymértékben meghatározzák a kapott SCC-t. Az IAM-ek hosszú távú diszkontrátát is feltételeznek, vagy – mint a DICE-ban – a megoldás részeként kiszámítják az optimális belső diszkontrátát.

A kárfüggvény kidolgozásának egyik megközelítése az, hogy a világ országainak egyes ágazataiban a felmelegedés költségének (vagy hasznának) becslésével kezdik, és ezeket összesítik egy globális összegré. Ezt a megközelítést alkalmazták a FUND-ban is. Alternatív megközelítést jelent egy egyszerű egyenlet kidolgozása, ami a globális jövedelmet az átlagos globális hőmérséklet egyszerű kvadratikusan függvénye szerint bünteti. Ezt a megközelítést alkalmazták a DICE modellben. A FUND modell esetében több száz paramétert kellett kiválasztani, míg a DICE modellben csak hármat. E hármat választották ki ahhoz, hogy a globális kibocsátáshoz 3°C-os felmelegedéstől kezdődően egy előre meghatározott büntetést (1,2%) rendeljenek, egy kvadratikusan taggal, amely azt jelenti, hogy a károk a globális átlaghőmérsékleti anomália négyzetével arányosan nőnek. Barrage és Nordhaus (2024) a közelmúltban megváltoztatták a paramétereket, és a büntetést 3°C-on 1,6%-ra növelték, valamint 3°C-os felmelegedésnél további 1,0 százalékos GDP-büntetést adtak hozzá, hogy figyelembe vegyék a „fordulópontokat” (a felmelegedési küszöb átlépése által kiváltott hirtelen, nagyléptékű környezeti változásokat), valamint egy 0,5 százalékos „ítéleti korrekciót” a 3°C-os felmelegedés esetén kizárt hatásokra. Nem meglepő módon a DICE újabb verziója sokkal magasabb SCC-becslést generál, mint korábban.

A becslés és a bizonytalanság fogalmai nem alkalmazhatók azonnal az egyensúlyi klímaváltozás (SCC) számításaira. Semmilyen mennyiségű adatgyűjtés nem változtathat azon a tényen, hogy az SCC számos összetevője ismeretlen, és az éghajlatváltozás fizikai hatásairól szóló mögöttes szakirodalom ismeretén alapuló megítélésen és véleményen alapul. Az SCC-számításokat ezért legjobb „ha-akkor” állításoknak tekinteni: ha a következő feltételezések teljesülnek, akkor az SCC tonnánként X dollárt jelent. A „ha” állítások listája tartalmazza azt a feltételezést, hogy a világ éghajlata és gazdasága az IAM-ben leírtak szerint működik. Ennek egyik lehetséges oka a felmelegedés időzítése. Minden IAM feltételez az egyensúlyi klímaérzékenységre (ECS) egy olyan értéket, amely a CO₂-kibocsátásból eredő felmelegedés mértékét szabályozza, és szabadon változtatható az ECS-sel kapcsolatos bizonytalanságokkal társított SCC-értékek eloszlásának létrehozása céljából. De ahogy Roe és Baumann (2013) rámutattak, az egyensúlyi idő az ECS négyzetével nő, így az ECS-paraméter felfelé történő módosítása a beállítási folyamat megfelelő lassítása nélkül torz jelenérték-kárbecsléseket okozhat. Különösen a felmelegedés néhány gyakran használt ECS-eloszláshoz kapcsolódó felső tartománya, ami fizikailag még ezer év múlva is lehetetlen (Roe és Baumann 2013), egy IAM-ben mégis néhány évszázadon belül megvalósulna. Az ECS és az egyensúlyi idő összehangolásának elmulasztása az SCC értékének túlbecsléséhez vezet.

11.2.2 Az SCC változásai

Az IAM-számítás minden szintje feltételezéseket tartalmaz, némelyik befolyásosabb, mint mások. A főbb feltételezések a következők:

- A diszkontráta: Az éghajlati károk hosszú időhorizonton halmozódnak fel, és az egy-két évszázaddal későbbi költségeket a jelenre kell diszkontálni. Minél magasabb a diszkontráta, annál kisebb a jövőbeni károk jelenértéke, és fordítva. A diszkontráta a pénz ma történő elköltésének alternatív költségét jelenti ahelyett, hogy befektetnénk, majd holnap többet költenénk. Egyes közgazdászok az SCC-számításokban nagyon alacsony diszkontráták alkalmazása mellett érvelnek, ami olyan politikai ajánlásokhoz vezetett, amelyek a CO₂-kibocsátás csökkentésébe történő viszonylag nagy azonnali beruházásokat részesítik előnyben. A hátránya, hogy más beruházások potenciálisan nagyobb megtérülést hozhatnak a társadalom számára.
- Egyensúlyi klímaérzékenység: Az IAM-ek az IPCC útmutatásait követve szokásosan 3,0°C vagy 3,1°C értéket alkalmaztak. A legfrissebb, adat alapú ECS-értékek általában ennél alacsonyabbak (lásd a 4. fejezetet). Dayaratna et al. (2017, 2020, 2023) kimutatták, hogy az alacsonyabb, empirikusan származtatott ECS-értékek használata drámaian csökkenti a kapott SCC-bebecslést, még alacsony diszkontráták alkalmazása esetén is.
- Kárfüggvény-együtthatók: Az IAM-ek feltételezik, hogy a CO₂ és a felmelegedés nettó károkozók, és a károk a hőmérséklettel exponenciálisan nőnek. Az újabb IAM-ekbe a feltételezett potenciális éghajlati fordulópontok hatásait is beépítették. A FUND modell korlátozottan, de explicit módon figyelembe vette a CO₂-trágyázás hatásait a mezőgazdaságban. Mivel az együtthatókat a globális zöldülés jelenlegi bizonyítékainak és a megnövekedett CO₂-szintből a növényekre gyakorolt előnyök nagyságának közzététele előtt választották ki (lásd a 2. és 9. fejezetet), a növekedési hatásokat valószínűleg alábecsültek. A DICE modell (és mások) nem tartalmaztak explicit módon semmilyen CO₂-trágyázási előnyt, kivéve, ha azt a kárfüggvény-együtthatók kiválasztásakor a felhasznált szakirodalomban figyelembe vették. A FUND kárfüggvénye tartalmaz egy olyan régiót, amelyben az alacsony felmelegedés számos régióban nettó előnyöket eredményez, e megállapítást alátámasztják a felmelegedés és növekedés ökonometriai modelljei (Berg et al. 2023), valamint a mezőgazdasági változások ökonometriai szimulációi (McKitrick 2025). A DICE kárfüggvény - felépítéséből adódóan - bármilyen felmelegedési szinten kizárja a nettó előnyöket.
- Emissziós forgatókönyvek: Az IAM-ok olyan SCC-bebecsléseket generálnak, amelyek a meglévő CO₂-koncentráció emelkedésével nőnek. Következésképpen a károk értéke az évszázad későbbi szakaszában magasabb lesz, az elkövetkező évtizedekben feltételezett alapkibocsátásoktól függően.

Néhány integrált modell (mint például a DICE) tartalmazza a CO₂-kibocsátáscsökkentés gazdaságra gyakorolt költségeit, hogy meghatározzon egy optimális növekedési pálya menti SCC-t. Ha a CO₂-kibocsátás csökkentését olcsónak feltételezzük, akkor a modell arra a következtetésre jut, hogy az optimális politikának a nagyobb kibocsátáscsökkentésre kell törekednie, és fordítva.

Informatív megállapítás, hogy az SCC eredményei invariánsak-e bizonyos feltételezések változásaival szemben. De amikor különféle feltételezések magasabb vagy alacsonyabb SCC-értékeket eredményeznek, az SCC-érték változása nem szolgáltat elsődleges bizonyítékot a feltételezések érvényességére. Például 2023-ban az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége körülbelül ötszörösére emelte az általa preferált SCC-értéket a tíz évvel korábban kiadott becslésekhez képest. Ez nem azért van, mert új adatokat gyűjtöttek, vagy jobb matematikai módszereket találtak fel, hanem azért, mert új feltételezéseket alkalmaztak, és ezeknek a feltételezéseknek az érvényessége mindettől független kérdés. Az EPA (2023) 81. oldalán található táblázatok azt mutatják, hogy ha a korábbi elemzésekhez hasonló feltételezéseket alkalmaztak volna, az eredmények nem különböztek volna lényegesen a korábbiaktól. Az egyik új feltételezésük az volt, hogy Moore et al. (2017) elemzése alapján a globális mezőgazdasági károk a korábban vélténél jóval nagyobbak. De ahogy a 9. fejezetben tárgyaltuk, McKitrick (2025) kimutatta, hogy Moore et al. (2017) egy olyan adatbázist használt,

amelyben a CO₂-változási megfigyelések fele hiányzott. Amikor a lehető legtöbb megfigyelést újra figyelembe vették a rendelkezésre forrásokból, és az elemzést megismételték, a várható terméshozam-veszteségek eltűntek, és minden felmelegedési szinten nyereséggé alakultak. Ezért az EPA SCC-felülvizsgálatában a mezőgazdasági terméshozamnak tulajdonított veszteséggel foglalkozó rész alaptalan volt.

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

A 2. fejezet áttekintette a klímaváltozással és a zöldítéssel kapcsolatos bizonyítékokat, a 9. fejezet pedig az éghajlatváltozást és az amerikai mezőgazdaságot vizsgálta. A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂-trágyázás sokkal jótékonyabb hatással van a mezőgazdaságra, mint azt akkoriban tudták, amikor az olyan IAM-eket, mint a DICE és a FUND paraméterezték. Haverd et al. (2020) azt találta, hogy a megfigyelt CO₂-trágyázási arány majdnem kétszerese volt a termésmoდეllek által előrejelzettnek. Dayaratna et al. (2023) Lewis (2022) frissített - modern műszeres és paleoklíma-hőmérsékleti adatokat asszimiláló - empirikus ECS-eloszlásbecslését használta, és a FUND modellben 30 százalékos CO₂-trágyázási haszonnövekedést vette figyelembe. Úgy találta, hogy 2050-re a medián SCC még alacsony, 2,5 százalékos diszkontráta mellett is mindössze 18,67 dollár, a valódi érték 24 százalékos valószínűséggel negatív. Öt százalékos diszkontráta mellett a medián SCC-érték a 2040-es évek közepéig negatív, 2050-ben pedig csak 0,37 dollár volt, 49 százalékos valószínűséggel negatív. Így ésszerű feltételezések mellett a frissített tudományos adatokat használó mainstream IAM olyan bizonyítékot szolgáltat, amely alátámasztja azt, hogy az SCC nem szignifikánsan nagyobb nullánál.

Azt is meg kell jegyezni, hogy az SCC a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó CO₂-kibocsátás társadalmi költségeire összpontosít. Nem célja a fogyasztók és a társadalom számára a fosszilis tüzelőanyagok elérhetőségéből származó magán-határhasznok mérése. A lakosság hajlandósága arra, hogy bármilyen típusú üzemanyagért fizessen, a megbízható, bőséges fosszilis energia társadalmi értékét jelzi. Tol (2017) becslése szerint a szén-dioxid egyéni haszna a társadalmi költségekhez képest nagy. Szemléltetésül: egy gallon benzin ára az üzemanyag fogyasztója számára jelentkező határértékét jelzi. Tegyük fel, hogy a szén-dioxid társadalmi költségét viszonylag magasnak tekintjük, mondjuk tonnánként 75 dollárnak. Deflálva egy 1,5-ös MCPF⁴ értékkel, ami tonnánként 50 dolláros szén-dioxid-adót eredményezne, benzin esetén megfelelne 44 cent/gallonnak (Lavelle, 2019). A adózás előtti 3,00 dollár/gallon ár azt jelentené, hogy az üzemanyag társadalmi határköltsége közel hétszerese a társadalmi határköltségnek.

11.2.4 Fordulópontok

Az SCC-számítások jellemzően a melegedő éghajlat fokozatos hatásait veszik figyelembe, mint például a lassan olvadó gleccserek és az emelkedő átlaghőmérséklet. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségének (SCC) potenciálisan magas értékeiben az egyik mozgatórugó a hirtelen változásokhoz kapcsolódó hirtelen katasztrofális következmények bevezetése a modellekbe (Dietz et al., 2021). Ezeket gyakran nevezik „fordulópontoknak” vagy billenőpontoknak.

A „fordulópont” kifejezés két eltérő fizikai fogalmat ötvöz, amelyek különféle kutatási kihívásokat jelentenek. Sok fizikai rendszer eredendően stabil, hacsak nem hat rá elegendően nagy külső energia. Például egy jégsapka széles hőmérsékleti tartományban érintetlen maradhat, de amint a hőmérséklet átlépi a 0°C-os küszöböt, elolvad. Az ilyen hirtelen átmenetek mindenütt jelen vannak a természetben, és külső erőt igényelnek. Az, hogy az erőnek a rendszer méretéhez képest nagynak kell-e lennie, a rendszer mögöttes stabilitásától függ.

⁴A közpénzek határköltsége: az optimális szén-dioxid-adóhányad az SCC osztva az MCPF-vel (Sandmo 1977).

Egy másik típusú fordulópontnak a neve bifurkáció, ami a nemlineáris rendszerek belső dinamikájának tanulmányozásából származik (Crawford, 1991). Számos rendszerről megfigyelték, hogy egynél több egyensúlyi ponttal rendelkezik, amelyek között minimális külső befolyással vagy akár anélkül is átmozdulhat. Például egy időjárási rendszernek két különböző egyensúlyi állapota lehet: az egyikben szélesend van, a másikban pedig tornádó. Az egyikből a másikba való átmenet külső erőhatás nélkül vagy apró változással is megtörténhet, például a közmondásos pillangó szárnycsapásával (Shen et al. 2014). A „fordulópont” kifejezést néha az ilyen típusú bifurkációra használják, ami magában a rendszerben rejlő, külső erőktől nem feltétlenül függő instabilitást sugall. Ehelyett a rendszer paramétereitől függ, amelyek olyan értékeket vesznek fel, amelyek aláátaszják a bifurkációk kialakulását (Crawford, 1991).

A két eltérő koncepció különböző kutatási kérdéseket vet fel. Az elsővel kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az éghajlati rendszer összetevői kellően nagy antropogén kényszer hatására érzékenyek-e hirtelen változásokra. A másodikkal kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy a Föld éghajlati rendszerének vannak-e olyan eredendő bifurkációi, amelyek külső kényszer hatására vagy anélkül hirtelen átmeneti lehetőséget jelenthetnek.

Olyan modelleket fejlesztettek ki, amelyek arra utalnak, hogy a második típus is lehetséges. Kypke et al. (2020) egyszerű éghajlati modelljében az üvegházgáz-koncentráció egyike azon paramétereknek, amelyek az arktiszi éghajlat olyan bifurkációinak kialakulását szabályozza, amelyben hideg és meleg egyensúly is lehetséges. Ha kellően magas üvegházgáz-kényszert és kellően magas óceáni hőszállítási sebességet hoznak létre, akkor lehetővé válik a bifurkáció. Általánosabb megfigyelés szerint a globális klímaváltozási rendszerek bifurkációkat és többszörös egyensúlyokat tartalmaznak (Brunetti és Ragon, 2023).

A bifurkációk esetleges létezése a Föld éghajlati rendszerében azt jelenti, hogy hirtelen átmenetek lehetségesek, nemcsak nagy kényszerítésekre, hanem kis perturbációkra is. Ez a fordulópontokat az olyan alacsony valószínűségű és potenciálisan katasztrofális események kategóriájába sorolja, mint például egy nagy meteorbecsapódás. Kulcsfontosságú kérdés, hogy vajon az ilyen típusú fordulópontok előre jelezhetők-e. A jelenlegi kutatások nem oldották meg ezt a kérdést (Dakos et al., 2024), és valószínűleg nem is lesznek képesek rá, mivel a „pillangóhatás” egyik következménye, hogy a nemlineáris rendszerekben kiszámíthatósági határok léteznek (Palmer et al., 2014). Ezért nem nyilvánvaló, hogyan lehet ezeket a lehetőségeket beépíteni az SCC-számításokba. A feltételezések kis eltérései a kapott SCC-ben önkényesen nagy eltérésekhez vezetnek, és nincs alapunk választani közöttük. Ha ilyen fordulópontok lehetségesek, a gazdaságpolitika legmegfelelőbb álláspontja a külső katasztrófákkal szembeni ellenálló képesség maximalizálása, mivel nem valószínű, hogy meg tudnánk jósolni vagy meg tudnánk akadályozni a bekövetkezést. Az AR6 (WGI, 1. fejezet) főként az első típusú fordulópontokra összpontosít, nevezetesen a külső kényszerre adott hirtelen változásra. Ez a jelentés jár együtt a „fordulópont” fogalmának népszerű használatával is az éghajlatváltozással kapcsolatos vitákban (lásd például itt: <https://report-2023.global-tipping-points.org/what-is-a-tipping-point/>). Ahogyan az AR6 összefoglalja, a paleoklíma-adatokban vannak hirtelen változásokra utaló jelek, és ezek közül néhányat fordulópontként értelmeztek. Egyes földrendszer-modellekkel végzett előrejelzések olyasféle fordulópontokat adtak ki, mint például az amazonasi erdők pusztulása a CO₂-koncentráció, illetve a hőmérséklet meghatározott értékére etörténő emelkedése esetén.

Éghajlati fordulópontokat övező riadalom tükröződik a Globális Fordulópontokról szóló 2023. december 6-án a COP28 konferencián közzétett jelentésben (Lenton et al., 2023). A jelentés az éghajlati rendszer több mint 25 olyan részét azonosítja, amelyekről azt mondják, hogy fordulópontokat alkotnak. Amit éghajlati „fordulópontnak” minősítenek, az egy mozgó célpont. A szakirodalomban és az értékelő jelentésekben szereplő leggyakoribb példák közé tartozik a grönlandi jégtakaró szétesése, a nyugat-antarktiszi jégtakaró szétesése, az északi-sarki tengeri jég nyári eltűnése, az amazonasi esőerdők elpusztulása, a korallzátonyok pusztulása, az örökfagy és a metánhidrátok felengedése, az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása, a boreális erdők eltolódása, a nyugat-afrikai monszun eltolódása és az indiai monszun eltolódása.

Minden efféle fordulóponthoz bizonyos fokú rendszerinstabilitás szükséges, hogy felmelegedésre hirtelen átmenetet mutatakozzon. Emiatt úgy tűnik, nagyon kevés különbséget lehet tenni a fordulópont és a természetes éghajlati változékonyság között. A természetes éghajlati változékonyság a múltban eltolódásokat okozott a nyugat-afrikai és indiai monszunokban, pusztítást az amazonasi erdőkben és a korallzátonyokban, valamint szétesést a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégta-
karok egyes részeiben. E hatások a természetes éghajlati változékonyság és az ökoszisztéma-
válaszok évtizedes és évszázados időléptékeiben mind visszafordíthatók.

Súlyosabb következmények lehetőségét hordozza néhány olyan hirtelen lehetséges változás, mint a nyugat-antarktiszi jégta-
kar összeomlása és az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása. Az AR6 WG1 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalója szerint:

Az Atlanti Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) a 21. században minden kibocsátási forgatókönyv esetén nagy valószínűséggel gyengülni fog. Míg a 21. századi csökkenést *nagy valószínűséggel* valószínűsítik, a trend nagyságrendjét illetően csak *alacsony* a bizalom. *Közepes a bizalom* abban, hogy 2100 előtt nem lesz hirtelen összeomlás. (C.3.4)

Korlátozott bizonyítékok szerint bekövetkezhetnek kis valószínűségű, nagy hatású kimenetek (amelyeket pl. mély bizonytalansággal jellemzett, egyes esetekben fordulópontokat is érintő jégta-
kar-instabilitási folyamatok okoznak), amelyek magas ÜHG-kibocsátású forgatókönyvek (pl. SSP5-8.5) esetén évszázadokra jelentősen növelnék az antarktiszi jégvesztést. (B.5.2)

SCC-számítások esetében az ilyen típusú fordulópont által implikált kutatási kérdés az, hogy vajon megfigyelték-e már efféle eseményeket a múltban a jelenleg tapasztalathoz hasonló éghajlati körülmények között, vagy a közeljövőben fognak-e ilyet észlelni. Az AR6 kevés bizonyítékot talál az Atlanti-óceáni Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) vagy a Nyugat-Antarktiszi jégta-
kar közelgő összeomlására. Megállapítja viszont, hogy az Északi-sarki tengeri jéghez nem kapcsolódik fordulópont (AR6 Műszaki Összefoglaló, 76. o.)

Dietz et al. egy SCC-modellbe számos potenciális fordulópontot (hirtelen változást) épített be. Úgy találták, hogy körülbelül 25 százalékkal emelték a becslést, főként az örökfagy olvadásával és a metánhidrátok felszabadulásával összefüggésben. Az IPCC azonban ezt a forgatókönyvet nagyon valószínűtlennek tartja (AR6 Technikai Összefoglaló, 107. o.).

Összefoglalva, következhetnek be a természetes éghajlati folyamatokhoz kapcsolódó ismeretlen bifurkációs fordulópontok, de ez a lehetőség nem fordítható le konkrét útmutatásként az SCC-re vonatkozóan. Előfordulhatnak a felmelegedés következményeként a klímarendszerben potenciálisan hirtelen változási pontok, bár az IPCC a legtöbbször, beleértve a legnagyobbakat is, alacsony valószínűséget rendel. Ha mindezeket figyelembe vesszük, eredményül azt kapjuk, hogy az SCC értéke a 21. században csak szerény mértékben nő.

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

Egyre inkább azt állítják, hogy az SCC-ben túlságosan nagy változások vannak ahhoz, hogy az hasznos legyen a politikai döntéshozók számára. A Cambridge Econometrics (Thoung, 2017) kijelentette, hogy a bizonytalanságok miatt „itt az ideje kinyírni”. Az Egyesült Királyság és az EU már nem használja az SCC-t a szakpolitikai értékeléshez, és a „célokkal konzisztens” szén-dioxid-árazást választja (UK Department for Energy Security and Net Zero 2022, Dunne 2017). Az SCC-becslések bizonytalansága azonban nem jelenti azt, hogy az egyéb szabályozási eszközök eredendően jobbak vagy hatékonyabbak lennének. Számos kibocsátási szabályozás (például az elektromos járművekre vonatkozó előírások, a megújuló energiaforrásokra vonatkozó előírások, az energiahatékonysági előírások és bizonyos típusú háztartási gépek tilalma) tonnánként sokkal nagyobb

kibocsátáscsökkentési költséget okoz, mint bármely általános SCC becslés, ami elegendő annak megállapításához, hogy a költség-haszon tesztnek egyikük sem felel meg.

Hivatkozások

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar, K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan (2014) Key economic sectors and services. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659-708. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf
- Barker, D. (2023) Temperature Shocks and Economic Growth: Comment on Dell, Jones, and Olken. *Econ Journal Watch* 20(2) 234-253 <https://econjwatch.org/articles/temperature-shocks-and-economic-growth-comment-on-dell-jones-and-olken>
- Barrage, Lint and William Nordhaus (2024) Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121 (13) e2312030121 <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>
- Berg, Kimberly, Chadwick C Curtis and Nelson Mark. (2021) GDP and temperature: Evidence on cross-country response heterogeneity. NBER Working Paper 31327 June 2023 <http://www.nber.org/papers/w31327>
- Blickle, Kristian; Sarah N. Hamerling, and Donald P. Morgan (2021) : How bad are weather disasters for banks?, Staff Reports, No. 990, Federal Reserve Bank of New York, New York, NY <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/247913/1/sr990.pdf>
- Brunetti, Maura and Charline Ragon (2023) Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. *Physical Review E* 107 054214 <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.054214>
- Burke, Marshall, Solomon M Hsiang, and Edward Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577):235–239.
- Council of Economic Advisors-Office of Management and Budget (CEA-OMB 2023) Methodologies and considerations for integrating the physical and transition risks of climate change into macroeconomic forecasting for the president’s budget. March 13, 2023. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf>
- Crawford, John D (1991) Introduction to Bifurcation Theory. *Reviews of Modern Physics* 63(4) October 1991 991—1037.
- Dakos, Vasilis, Chris Boulton, Joshua Buxton et al. (2024) Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics* 15 1117—1135 <https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024>
- Dayaratna, Kevin and Ross McKittrick (2023) "Reply to comment on “climate sensitivity, agricultural productivity and the social cost of carbon in fund” by Philip Meyer" *Environmental Economics and Policy Studies* 2023 link.springer.com/article/10.1007/s10018-023-00364-2
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <https://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American economic journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95, 2012. ISSN 1945-7707.

- Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner (2021) Economic impact of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Science* 2021 Vol. 118 No. 34 e2103081118
- Dunne, Daisy (2017), "Q&A: The Social Cost of Carbon," *Carbon Brief*, February 14, 2017, <https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/>
- Formetta, Giuseppe and Luc Feyen (2019) Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Global Environmental Change* 57 101920 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.004>
- Greßer, Christina, Daniel Meierrieks, and David Stadelmann (2021) The link between regional temperature and regional incomes: econometric evidence with sub-national data. *Economic Policy*, 36(107):523–550, 2021.
- Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402.
- Hu, Bin and Ross McKittrick (2015) Climatic Variations and the Market Value of Insurance Firms. *Journal of Insurance Issues* Vol. 39, No. 1, pp. 92-111 <https://www.jstor.org/stable/43741103>
- Kypke, K. L., Langford, W. F., and Willms, A. R.: Anthropocene climate bifurcation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 27, 391–409, <https://doi.org/10.5194/npg-27-391-2020>, 2020.
- Lavelle, Marianne (2019) Carbon Tax Plans: How They Compare and Why Oil Giants Support One of Them. *Inside Climate News* March 7, 2019 <https://insideclimatenews.org/news/07032019/carbon-tax-proposals-compare-baker-shultz-exxon-conocophillips-ccl-congress/>
- Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, et al. (eds) (2023) *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK. <https://report-2023.global-tipping-points.org/>
- Lewis, N., (2013) An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. *Journal of Climate*, 26, 7414-7429. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00473.1>
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mohaddes, Kamiar, Ryan Ng., Hashem Psaran, Mehdi Raissi and Jui-Chung Yang (2023) Climate change and economic activity: evidence from US states. *Oxford Open Economics* Vol 2 odac010 <https://doi.org/10.1093/ooec/odac010>
- Moore, Frances C. and Delavane B. Diaz (2015) Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2):127–131, 2015. ISSN 1758-678X.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Newell, Richard G., Brian C. Prest, and Steven E. Sexton (2021). The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108 <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445>
- Nordhaus, William (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10):3510–3517, 2006. ISSN 0027-8424.
- Nordhaus, William. (2018) Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* August 2018, 10(3): 333-360. <https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model *American Economic Review* Vol. 83, No. 2, (Papers and Proceedings) pp.313-317.
- O'Neill, Brian C. (2023) Envisioning a future with climate change. *Nature Climate Change* 13, pages 874–876 <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01784-4>
- Palmer, TN, A Döring and G Seregin (2014) The real butterfly effect. *Nonlinearity* 27(9) 10.1088/0951-7715/27/9/R123 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/27/9/R123/meta>
- Pielke Jr., Roger (2018): Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, *Environmental Hazards*, DOI: 10.1080/17477891.2018.1540343

- Pielke Jr., Roger (2020) Economic ‘normalisation’ of disaster losses 1998–2020: a literature review and assessment,” *Environmental Hazards*, 2020, pp. 1-19
- Pielke Jr., Roger (2023) Global disaster losses: 1990-2023 Substack essay
<https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>
- Resources for the Future (2025) “Social Cost of Carbon Explorer,” Resources for the Future website, accessed April 22, 2025, <https://www.rff.org/publications/data-tools/scc-explorer/>.
- Roe, Gerard H. and Yoram Bauman (2013) Climate Sensitivity: Should the climate tail wag the policy dog? *Climatic Change* (2013) 117:647–662 DOI 10.1007/s10584-012-0582-6
- Sandmo, Agnar (1975) “Optimal Taxation in the Presence of Externalities.” *Swedish Journal of Economics* 77 (1), 86–98.
- Schelling, Thomas C (1992) Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 82 (1):1–14.
- Shen, Bo-Wen, Roger A Pielke Sr and Xubin Zeng (2023) The 50th Anniversary of the Metaphorical Butterfly Effect since Lorenz (1972): Multistability, Multiscale Predictability, and Sensitivity in Numerical Models. *Atmosphere* 2023 14(8) <https://doi.org/10.3390/atmos14081279>
- Storm, S (2017) “How the Invisible Hand is Supposed to Adjust the Natural Thermostat: A Guide for the Perplexed.” *Science and Engineering Ethics* vol 23: 1307—1331.
- Thoung, Chris (2017) “Is It Time to Kill Off the Social Cost of Carbon?” *Cambridge Econometrics Blog*, September 14, 2017, <https://www.camecon.com/blog/time-kill-social-cost-carbon/>.
- Tol, Richard S.J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND *Environmental Modeling and Assessment* 2: 151—163.
- Tol, Richard S.J. (2017). "The Private Benefit of Carbon and its Social Cost," Working Paper Series 0717, Department of Economics, University of Sussex Business School.
<https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html>
- Tol, Richard S.J. (2024) A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy* 185 113922 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>
- UK Department for Energy Security and Net Zero (2022). “Carbon Valuation.” GOV.UK, last updated April 4, 2022. <https://www.gov.uk/government/collections/carbon-valuation--2>.
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, November 2023,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
 accessed February 28, 2024.
- Yang, Yimin, Fei Jia, and Haoran Li. Estimation of panel data models with mixed sampling frequencies (2023). *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 85(3):514–544.
- Zhao, Xiaobing, Mason Gerety, and Nicolai V. Kuminoff (2018) Revisiting the temperature-economic growth relationship using global subnational data. *Journal of environmental management*, 223:537–544, 2018.

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

Fejezet-összefoglaló

Az USA politikai intézkedéseinek várhatóan észrevehetően kicsiny közvetlen hatása lesz a globális éghajlat alakulására, és minden egyes hatás csak nagyon hosszú idő elteltével jelentkezik.

12.1 A léptékprobléma

A kritikus légszennyező anyagok kibocsátási rátái és légköri koncentrációi szorosan összefüggenek, mivel élettartamuk rövid, koncentrációjuk pedig kicsi; tehát amikor a lokális kibocsátás csökken, a lokális szennyezőanyag-koncentráció gyorsan csökken, általában néhány napon belül. A globális átlagos CO₂-koncentráció azonban egészen másképp viselkedik, mivel a kibocsátások globálisan keverednek, továbbá a globális szén ciklus hatalmas és lassú. A lokális CO₂-kibocsátás bármilyen változása ma csak nagyon kis globális hatással jár, és csak hosszú időkeletteléssel.

A CO₂ légkörbe történő kibocsátását követően a többlet CO₂-nek csak körülbelül 40±15 százaléka kötődik meg húsz év alatt. Ez a hányad ezer év után 75±10 százalékra emelkedik, a fennmaradó rész pedig fokozatosan eltávolításra kerül az azt követő több tízezer év folyamán (Ciais et al., 2013, 472-473. o.). Következésképpen az amerikai kibocsátások bármilyen csökkentése csak mérsékelten lassítaná, de nem akadályozná meg a globális CO₂-koncentráció emelkedését. És még ha a globális kibocsátások holnap meg is állnának, évtizedekbe vagy évszázadokba telne, mire a globális CO₂-koncentráció, és így az éghajlatra gyakorolt emberi hatások érdemi csökkenését tapasztalnánk.

A légköri CO₂-készlet csökkentése megkövetelné, hogy a kibocsátás a természetes megkötési ráta alá csökkenjen, feltételezve, hogy a teljes növekedés antropogén. Mivel ez a ráta az elmúlt évtizedekben a kibocsátás átlagosan körülbelül 50 százalékát tette ki, a globális kibocsátás 50 százalékos csökkentése (legalábbis ideiglenesen) megállítaná a légköri CO₂ növekedését. Az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv azt javasolta, hogy az ipari országok CO₂-kibocsátását 2012-re az 1990-es szinthez képest szerény, öt százalékos csökkentési szinten korlátozzák. Bár ezt a politikát a legtöbb ország számára túl nehéz volt megvalósítani, a teljes betartás a légköri CO₂-szintet nem csökkentette volna jelentősen. Csak kismértékben lassította volna a CO₂ növekedését, úgy, hogy a 2100-as évre előre jelzett szintet 2105-re érnénk el (Wigley, 1998). Lomborg (2016) becslése szerint a Párizsi Megállapodásban vállalt kezdeti kötelezettségek teljes betartása nem állítaná meg a felmelegedést, csupán körülbelül 0,1 Celsius-fokkal akadályozná meg a felmelegedést, és körülbelül egy évtizeddel késleltetné a 2100-as alaphőmérsékleti szint elérését.

Így a hagyományos légszennyezés-szabályozással ellentétben még a drasztikus helyi intézkedéseknek is elhanyagolható helyi hatásaik lesznek, és az is csak hosszú időkeletteléssel. Az a gyakorlat, hogy az egyoldalú amerikai csökkentéseket „éghajlatváltozás elleni küzdelemnek” vagy „éghajlatváltozás elleni fellépésnek” nevezik, és azt feltételezik, hogy képesek vagyunk megállítani az éghajlatváltozást, a probléma mértékének mély félreértését tükrözi.

12.2 Esettanulmány: Az USA-gépjárművek kibocsátása

A léptékprobléma az amerikai gépjárművek példáján keresztül jól illusztrálható. Az EPA 2009-es veszélyeztetettségi megállapítása az Egyesült Államokban a személygépkocsik és a könnyű tehergépkocsik CO₂-kibocsátására összpontosított, mivel a Tiszta Levegő Törvény 202(a) szakasza felhatalmazza az EPA-t, hogy kibocsátási szabványokat határozzon meg a gépjárművek számára, ha a szennyező anyagokról kiderül, hogy veszélyeztetik a közegészséget vagy a jólétet. A 2009-es veszélyeztetettségi megállapítás ezért kötelezte az EPA-t az új gépjárművek kibocsátásának szabályozására, látszólag az amerikai lakosságot érő éghajlatváltozással kapcsolatos károk csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében.

Két természetesen felmerülő kérdés: (1) Mekkora CO₂-kibocsátáscsökkenést eredményezne egy ilyen szabályozás? és (2) Milyen lenne egy ilyen szabályozás éghajlati hatása?

Az első kérdésre úgy lehet válaszolni, hogy az amerikai járművek CO₂-kibocsátását összehasonlítjuk a globális összkibocsátással. A második kérdésre az a tény válaszolható, hogy a globális felmelegedés csökkenése az EPA által használt modellek szerint arányos lenne a globális kibocsátások csökkenésével, szem előtt tartva, hogy a légkör CO₂-tartalmának változása egy adott évben a teljes globális CO₂-kibocsátás eredménye, nem csak az amerikai kibocsátásé.

2022-ben az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik kibocsátása összesen 1,05 milliárd tonna szén-dioxidot tett ki (GtCO₂, EPA 2024). Eközben az energiafelhasználásból származó globális CO₂-kibocsátás összesen 34,6 GtCO₂ volt (Energy Institute 2024). Ezért az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik a globális energiával kapcsolatos CO₂-kibocsátásnak mindössze 3,0 százalékát teszik ki. Első közelítésben azt mondhatjuk, hogy még az összes amerikai járműalapú kibocsátás megszüntetése is egy-két évvel késleltetné a CO₂ felhalmozódását a légkörben egy évszázad alatt.

Ami az általános felmelegedési trendet is legfeljebb körülbelül 3 százalékkal csökkentené. Az 1979–2023 közötti időszakra, amely a legkiterjedtebb globális lefedettséggel rendelkezik az időjárási adattípusok közül, a felmelegedési trendeket körülbelül ± 15 százalékos pontossággal határozzák meg, így az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának megszüntetésével a globális felmelegedés ütemének csökkentésének hatása messze a mérhetőség határai alatt lenne. Tekintettel arra, hogy a globális átlaghőmérséklet a legközvetlenebb klímaváltozási mérőszám, az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának csökkentéséből eredő, a másodlagos klímamutatókra (pl. súlyos időjárás, árvizek, aszály stb.) gyakorolt hatások még kevésbé lennének mérhetőek.

Következésképpen, a helyi légszennyező anyagokkal (például apró részecskék és ózon) szemben hozott intézkedésekkel ellentétben, az amerikai járművek ÜHG-kibocsátására vonatkozó legagresszívabb szabályozási intézkedésektől sem várhatók el, hogy mérhető mértékben orvosolják az amerikai lakosságra leselkedő állítólagos klímaveszélyeket.

12.3 Zárógondolatok

E jelentés a klímapolitika tájékoztatása céljából árnyalt és bizonyítékokon alapuló megközelítést részesít előnyben, amely megközelítés kimondottan elismeri a bizonytalanságokat. A természetes és emberi hatások hatására bekövetkező éghajlatváltozás kockázatait és előnyeit össze kell mérni az „éghajlati intézkedések” költségeivel, hatékonyságával és járulékos hatásaival, figyelembe véve az ország megbízható és megfizethető energiára való igényét, a lehető legkisebb helyi szennyezés mellett. A globális éghajlati rendszer folyamatos, pontos, megszakítás nélküli megfigyelésén túl nagyon fontos, hogy reális feltételezéseket tegyünk a jövőbeli kibocsátásokkal kapcsolatban, az elfogultságok és bizonytalanságok kezelése érdekében újraértékeljük az éghajlati modelleket, és egyértelműen elismerjük el a szélsőséges események attribúciójával (oktulatdonításával) foglalkozó tanulmányok korlátait. A megalapozott és hatékony döntéshozatalhoz elengedhetetlen egy olyan megközelítés, amely a hibás modellekre és szélsőséges forgatókönyvekre való támaszkodás helyett elismeri a CO₂ potenciális kockázatait és előnyeit is.

Hivatkozások

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

EPA (2024) Fast Facts: U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022. Available online at <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P101AKR0.pdf>

- Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Available online at <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Lomborg, Bjorn (2016) "Impact of Current Climate Proposals" *Global Policy* 7(1) 109—118.
Available at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1758-5899.12295/full>.
- Wigley, T.M.L. (1998). "The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications." *Geophysical Research Letters* 25(13), 2285-2288

SZÓJEGYZÉK

2XCO₂: A légköri szén-dioxid (CO₂) megduplázódása, az éghajlatváltozás kezelésének általánosan használt alapértéke. 2025-ben a légköri CO₂-koncentráció körülbelül 50 százalékkal csökkent a 2XCO₂-hoz képest az 1800-as értékhez képest.

ACE (összegzett ciklonenergia): A trópusi ciklon élettartama alatt felhalmozódott energia statisztikai jellemzője; a maximális tartós szélesség-négyzetek összegzéséből számítják ki.

ACRIM (Aktív Üregradiométer Besugárzás Monitor) GAP: A teljes napsugárzási adatsorban az 1989 és 1991 közötti adathiány, amit az előző rendszerrel való átfedés és interkalibráció érdekében szükséges műholdas megfigyelő rendszer elindításának késése okozott.

AEROSZOL: A levegőben lebegő apró szilárd vagy folyékony részecskék sokasága.

AMO: Atlanti Többévtizedes Oszcilláció, a tengerfelszín-hőmérséklet 60 éves ciklusa az Atlanti-óceán északi részén.

ANTROPOGÉN: Emberek általi.

AR (Értékelő Jelentés): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület által közzétett időszakos értékelés, amelyek az éghajlati rendszerről, a globális változásról és a kapcsolódó kérdésekről szóló jelenlegi ismereteket értékelik. Egy AR ma három munkacsoport jelentésből áll: az első (WG1) a fizikai tudománnyal, a másik kettő pedig a társadalmi hatásokkal és az enyhítési stratégiákkal foglalkozik. A legutóbbi AR az AR6 volt.

ATTRIBÚCIÓ: Oktulajdonítás: ok-okozati összefüggés állítása, mindenekelőtt az antropogén ÜHG-kibocsátás és a megfigyelt éghajlati mintázatok között.

AUTOKORRELÁCIÓ: Az a jelenség, amelyben egy véletlenszerű idősoros változó aktuális értéke korrelál egy korábbi időszakban mért értékkel.

BIOMASSZA: A szerves anyag teljes mennyisége vagy tömege egy adott területen vagy térfogatban.

BRUTTÓ ELSŐDLEGES TERMELÉS: A növények által a fotoszintézis folyamán egy meghatározott időszak alatt felhasznált teljes kémiai energia. A nettó elsődleges termelés a légzéshez szükséges energia felhasználása utáni maradék, és ez jelenti a biomassza növekedéséhez való hozzájárulást.

CMIP (Kapcsolt Modell Összehasonlító Projekt): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület szervezett erőfeszítése számos különféle globális óceán-légkör éghajlati modell olyan módon való összehasonlítására, hogy a kényszer mindegyikben ugyanazon kibocsátási forgatókönyvv (forgatókönyvek) szerint alakul. A két legutóbbi a CMIP5 és a CMIP6 volt (az AR5, illetve az AR6 esetében).

CSÖKKENTÉS (abatement): A környezetpolitika kontextusában: kibocsátás-csökkentés.

DICE (Dinamikus Integrált Éghajlat- és Gazdaságmodell): A William Nordhaus által 1993-ban kidolgozott integrált értékelési modell.

DISZKONTRÁTA: A jövőbeni költségek és hasznok jelenértékre való átváltoztatására használt kamatláb. Fordított arányban változik a jelenértékkel, így a magas diszkontráta csökkenti a jövőbeni költségek és hasznok jelenértékét.

ECS (Egyensúlyi Klímaérzékenység): A légköri CO₂-koncentráció feltételezett megduplázódására adott válaszként a globális átlagos felszíni felmelegedésben bekövetkező hőmérsékletváltozás mértéke az iparosodás előtti szinthez képest.

ELHALÁLOZÁS: A halálesetek száma általában egy adott populációra és időszakra vonatkozóan kifejezve.

EL NIÑO: Az El Niño – Déli Oszcilláció meleg fázisa, amelynek idején a hideg víz a dél-amerikai partvidék mentén gyengébben áramlik fel, és gyengébbek a csendes-óceáni passzátszelek.

ENSO: El Niño – Déli Oszcilláció, egy kiemelkedő jelentőségű természetes éghajlati ingadozás, amely Dél-Amerika egyenlítői partján a hideg víz feláramlásának évenkénti változásait, valamint a Csendes-óceánon átívelő passzátszelek erősödését vagy gyengülését jelenti.

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS: Az éghajlat emberi hatások miatti változása, szemben az éghajlat változékonyságával, ami természetes eredetű

FACE: (Szabad levegőjű CO₂-dúsulás) Nagyléptékű szabadtéri vizsgálatok, amelyekben a növényeket megemelkedett CO₂-szintnek teszik ki, jövőbeli éghajlati forgatókönyveket szimulálva.

FOSSZILIS TÜZELŐANYAG: Természetes eredetű, a geológiai múltban élő szervezetek maradványaiból képződött széntartalmú tüzelőanyag, például szén, olaj vagy földgáz.

FOTOSZINTÉZIS: Az a folyamat, amelyben a növények növekednek, és amelyhez szén-dioxidra, vízre és fényre van szükség kellően meleg hőmérsékleten (10-35 Celsius fok az optimális működéshez).

FUND (Bizonytalanság, Tárgyalás és Eloszlás Keretrendszere): Richard Tol (1997) integrált értékelési modellje.

GBR (Nagy Korallzátony): A világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája Ausztrália északkeleti partjainál.

GDP (bruttó hazai termék): Egy ország határain belül, általában egy év alatt előállított összes végtermék és szolgáltatás piaci értéke.

GHCN (Globális Történeti Klimatológiai Hálózat): Időben változó számú, globális eloszlású meteorológiai állomások sokasága, ahol óránkénti, napi vagy havi csapadék-, hőmérséklet-, és esetenként havazás- és hóvastagság-mérést végeznek.

GLOBALIS ZÖLDÜLÉS: Az 1980-as évek eleje óta a legtöbb növényzettel borított szárazföldi területen műholdakkal megfigyelt zöldfelület-növekedés.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, beleértve az exportot és az importot is, általában egy évre vonatkoztatva.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes belföldön előállított végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, általában egy évre vonatkoztatva.

HURST JELENSÉG: Lásd: hosszú távú perzisztencia.

HIDROLÓGIA: A víz mozgásának tanulmányozása, különösen a szárazföldön és a légkörben.

IAM (Integrált Értékelési Modell): Egy számítógépes eszköz, amely a közgazdaságtant, a klímatudományt és a társadalomtudományokat ötvözi, hogy kvantitatív kapcsolatokat teremtsen az emberi és a földi rendszerek között, segítve a politikai döntések megalapozását.

IEA (Nemzetközi Energiaügynökség): Egy 1974-ben alapított párizsi székhelyű kormányközi szervezet, amely a globális energiaszektorról nyújt politikai ajánlásokat, elemzéseket és adatokat.

IPAROSODÁS ELŐTTI: Az a rövid történelmi időszak, amikor még az emberi üvegházgáz-kibocsátás nem volt jelentősnek tekinthető. Általában az 1700-as évek közepére teszik.

IPCC (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület): Az Egyesült Nemzetek Szervezete és a Meteorológiai Világszervezet által 1988-ban létrehozott nemzetközi szakértőkből és kormányzati képviselőkből álló testület, amelynek célja, hogy a klímapolitika kidolgozásához felhasználható, mindenre kiterjedő tudományos információkkal lássa el a kormányokat.

IR (Infravörös): Hősugárzás, amelyet minden szilárd tárgy és üvegházhatású gáz hőmérsékletének megfelelően bocsát ki.

KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYV: A jövőbeni üvegházgáz-kibocsátás (vagy az ebből eredő légköri koncentráció) feltételezett forgatókönyve, amely a globális gazdasági tevékenységre, a

fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának elterjedtségére és (esetenként) a szárazföld és az óceán CO₂-felvételének mértékére vonatkozó feltételezéseken alapul.

KÓNUSZ: Az Egyesült Államok területileg összefüggő 48 államának együttese.

KÖRNYEZETI (ambient): Ami valaminek a közvetlen környezetére vonatkozik.

KUKORICA: Tengeri.

LA NIÑA: Az ENSO hűvös fázisa, amelynek során a hideg víz erőbben áramlik fel a dél-amerikai partoknál, és erősebbek a csendes-óceáni passzátszelek.

LÚGOS: Aminek a kémiai pH-értéke nagyobb, mint 7,0. A savas „ellentéte”, ami 7,0-nél kisebb pH-értéket jelent.

MODELL: Számítógépes kód vagy kódgyűjtemény, amely számszerűsíti a különböző folyamatokról és azok közötti kölcsönhatásokról alkotott ismereteinket.

NCA (Nemzeti Éghajlat-értékelés): Az 1990-es Globális Változáskutatási Törvény által előírt időszakos jelentés, amely összefoglalja az éghajlatváltozás Egyesült Államokra gyakorolt hatását. Öt NCA-jelentés készült: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18) és NCA5 (2023).

OECD (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet): 38 tagországból álló csoport, amelyek demokratikus kormányzati rendszerrel és szabad gazdasági rendszerrel rendelkeznek.

ÖKONOMETRIA: A közgazdaságtan azon ága, amely a gazdasági rendszerek elemzésével a statisztikai módszerek (főként többszörös regresszió) alkalmazásával foglalkozik.

PALEOKLÍMA: A távoli múlt éghajlata (jellemzően a 1850 előtti időszaké). A modern időjárási eszközök széles körben elterjedése előtről ún. proxy (proxy, „közvetett”) méréseket, például fa-égyűrűket, jégmagokat virágporokat stb. használnak.

PDI (Teljesítmény Disszipáció Index): A trópusi ciklon időbeli felhalmozódott pusztító potenciáljának statisztikai becslése. A maximális tartós szélsőségek köbének összegzéseként számítják ki.

PDO: Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció, a Csendes-óceán medencéjének középponti részén ismétlődő óceán-légkör kölcsönhatás, amely túlnyomórészt meleg vagy hideg mintázatokkal jár, és befolyásolja a globális éghajlatot.

PPM: Egymilliomodnyi részecske, egy anyag koncentrációjának mértéke (például) a légkörben.

RCP (Reprezentatív Koncentráció Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházhatású gázok kibocsátására és azok légkörre gyakorolt hatására vonatkozóan. Ezeket az IPCC ötödik értékelő jelentésében (AR5) mutatták be. Az RCP forgatókönyvek számcímkeivel (pl. RCP6.0) rendelkeznek, ami azt jelzi, hogy mennyi sugárzási kényszert feltételeznek 2100-ban az iparosodás előtti időkhöz képest, watt/négyzetméterben. Az RCP4.5 és az RCP6.0 köztes forgatókönyvek, míg az RCP8.5 egy szélsőséges forgatókönyv, nagyon nagy jövőbeli üvegházhatású gázkibocsátással.

REGRESSZIÓ: Statisztikai módszer egy lineáris egyenlet együtthatóinak kiválasztására, hogy egy függő változó viselkedését egy vagy több változótól való függés segítségével magyarázzák.

RICARDI ANALÍZIS: A környezetgazdaságtanban használt, David Ricardoról elnevezett módszer az éghajlatváltozás gazdasági hatásainak, különösen a mezőgazdaságra gyakorolt hatás becslésére, azon hipotézis felhasználásával, hogy a jövőbeli mezőgazdasági tevékenységhez való megtérülés várható változásai a jelenlegi földértékekben tőkésülnek.

SAVASODÁS: Általánosan használt kifejezés az óceán pH-értékének lúgosabbról kevésbé lúgos értékekre való csökkenésére.

SCC (a szén társadalmi költsége): Annak a nettó gazdasági kárnak a becslése dollárban, jelenértéken mérve, amit egy tonna CO₂ légkörbe kibocsátási többlete okoz.

SSP (Megosztott Társadalmi-gazdasági Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházgáz-kibocsátásra és azok légkörre gyakorolt hatására. Ezeket az IPCC hatodik értékelő

jelentésében (AR6) mutatták be. Néhány SSP forgatókönyv régebbi RCP forgatókönyveknek felel meg, a folytonosság és a korábbi klímamodell-értékelésekkel való összehasonlítás céljából.

SUGÁRZÁSI VISSZACSATOLÁS: A felszínhőmérséklet megváltozása által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SUGÁRZÁSI KÉNYSZER: Az üvegházhatású gázok, antropogén aeroszolok, vulkánkitörések stb. által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SZÁRAZJÉG: Fagyott szén-dioxid.

SZÉN („karbon“): A periódusos rendszer 6. eleme. Gyakran használják a szén-dioxid rövidítéseként.

TC: Trópusi ciklon.

TMAX: A napi maximális felszíni levegőhőmérséklet.

TMIN: A napi minimális felszíni levegőhőmérséklet.

TOA: A légkör teteje.

TONNA: tonna, azaz 1000 kg.

TOXIKOLÓGIA: Vegyi anyagok élő szervezetekre gyakorolt káros hatásainak vizsgálata.

TREND: Egy általában lineáris regresszióval becsült együttható, ami az adatok idősorához legjobban illeszkedő egyenes meredekségét jelenti, jelezve a sorozat átlagának időbeni felfelé vagy lefelé történő mozgásában bekövetkező tendenciát.

TSI (Teljes Napbesugárzás): A Föld légkörét elérő, egységnyi területre jutó teljes beeső napsugárzás mennyiségének mértéke, beleértve az elektromágneses sugárzás teljes hullámhossz-tartományára kiterjedően. Általában watt/négyzetméterben (W/m²) adják meg.

ÜVEGHÁZHATÁS (GHE): Az a hajlam, hogy bármely, üvegházhatású gázt tartalmazó bolygó légköre a legalacsonyabb rétegekben melegebb, mintha ezen gázok a légkörben nem lennének jelen.

ÜVEGHÁZHATÁSÚ GÁZ (GHG, ÜHG, ÜVEGHÁZGÁZ): Olyan légköri gáz, amely az infravörös sugárzást elnyeli és kibocsátja, ilyen különösen a vízgőz, a CO₂ és a metán.

VESZÉLYEZTETETTSÉGI MEGÁLLAPÍTÁS (EF): A Környezetvédelmi Ügynökség igazgatójának 2009-es megállapítása, miszerint a jól elkevert üvegházhatású gázok (elsősorban a CO₂) kibocsátása veszélyezteti az emberi egészséget és jólétet.

UHI (Városi Hősziget): Az a jelleg, hogy a lakott területek melegebbek, mint vidéki környezetük, ami a természetes földterületek és növényzet utakkal, parkolókkal, épületekkel és hulladékhő-forrásokkal való felváltása miatt következik be.

USHCN: Az Egyesült Államok Történelmi Klimatológiai Hálózata, amely 1218 felszíni meteorológiai állomás minőségellenőrzött hőmérsékleti és csapadékadatait tartalmazza.

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

2.1. ábra: Képernyőkép Zhu et al. 2016 3. ábrájából <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>

2.2. ábra: Képernyőkép Gerhart és Ward (2010) munkájából 2. ábra:
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>

2.3. ábra: Képernyőkép a Copernicus Marine Services-ből
https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description

2.4. ábra: Képernyőkép az AIMS (2023) munkájából 2-4. ábra https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

3.1.1. ábra: Az AR6 WG1 Ch2 képernyőképe, 10. ábra

3.1.2. ábra: Az AR6 WG1 Ch7 képernyőképe, 7-6. ábra

3.1.3. ábra: A szerző által készített ábra. CO₂ adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

3.2.1. ábra: Képernyőkép Hausfather et al. (2019) S4. ábra <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

3.2.2. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: Freidlingstein et al. (2024)
<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519> Adatforrás: <https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

3.2.3. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

3.2.4. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

4.1. ábra: Képernyőkép Scafetta (2021) 1. ábra: <https://doi.org/10.3390/cli9110161>

5.1. ábra: Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> Szerző által létrehozott ábra. Modellenként egy együttestag, az éves átlaghőmérséklet a globális havi nyers hőmérsékletekből lett kiszámítva; a „tartomány” az egyes évek legmelegebb modellhőmérséklete és a leghidegebb modellhőmérséklet különbsége; A szórás mind a 33 modell nyers hőmérsékletein kiszámítva minden évben.

5.2. ábra: Scafetta (2023) képernyőképe 2. ábra <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>

5.3. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Modellenként egy SSP370 együttestag. Lineáris OLS trendek a globális havi hőmérsékleti anomáliákból számítva 1981-2010-hez viszonyítva.

5.4. ábra: A szerző által készített ábra, McKittrick és Christy (2020) 3. ábrája alapján
<https://doi.org/10.1029/2020EA001281>. Frissítve ugyanazokkal a módszerekkel és 2014-től 2024-ig kiterjesztett adatokkal, lásd McKittrick és Christy (2025) a fejezethivatkozásokban.

5.5. ábra: Az IPCC AR5 képernyőképe. 10.SM1 ábra, szerzői megjegyzésekkel

5.6. ábra: A szerző Christy és McNider (2017) <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z> nyomán készítette az ábrát, a frissített adatok a https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/ERA5_REANALYSES/ és

https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/JRA3Q_REANALYSES/ oldalon érhetők el, itt összeállítva:
https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/CWG25_Fig_5.7_Table_250627.xlsx

5.7. ábra: Képernyőkép a https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 oldalról (hozzáférés: 2017. május 27.) 2025)

5.8. ábra: Rugenstein és Hakuba (2023) képernyőképe 1. ábra <https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

5.9. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. OLS lineáris trendek. Modellként egy SSP370 együttes tag, átlagolt felszíni levegőhőmérsékletek júniustól augusztusig a 31N és 49N szélességi fok, 84W és 102W hosszúsági fok között. A NOAA/NCEI ugyanezen hónapokra vonatkozó megfigyelt hőmérsékleti adatai a <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/time-series> oldalon a 12 kukoricaövi államra vonatkozóan, átlagolva.

6.1.1. ábra Koutsoyiannis (2013) 10. ábrájának szerzői másolata
<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>

6.2.1. ábra Maue (2025) ábrájának képernyőképe <https://climatlas.com/tropical/>

6.2.2. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a Nemzeti Hurrikánközpontból (2024)
<https://www.nhc.noaa.gov/climo/>

6.2.3. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a NOAA Hurrikánközpontból
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

6.2.1. táblázat A szerző által létrehozott táblázat. NOAA HRD adatok
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html

6.3.1. ábra: Képernyőkép az NCA4-ből

6.3.2. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.3. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.4. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.5. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.6. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.7. ábra Képernyőkép a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> oldalról

Dobozos táblázatok. Szerző által létrehozott táblázat. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.1. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.2. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.3. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.4. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.5. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.5.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

6.7.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0>, hozzáférés: 2025. június 16. OLS trendvonal hozzáadva.

6.8.1. ábra: Lizundia-Loiola et al. (2021) képernyőképe. 12. ábra.

6.8.2. ábra: Marlon et al. (2012) képernyőképe. 2. ábra, C panel.
<https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>

6.8.3. ábra: A szerző által készített ábra. 1926-tól 2016-ig terjedő adatok:
https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html. 2017
utáni adatok: <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires> Hozzáférés: 2025. június 16.

7.1. ábra: Képernyőkép a <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/> oldalról

7.1. táblázat: A szerző által létrehozott táblázat. A 6.2. szakaszból a <https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2018/11/special-report-sea-level-rise-3.pdf>

7.2. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290
(letöltve: 2025.04.22.)

7.3. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450
(letöltve: 2025.04.22.)

7.4. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724
(letöltve: 2025.04.22.)

7.5. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750
(letöltve: 2025.04.22.)

7.6. ábra: A szerző által készített ábra. Adatok innen:
https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750

8.1. ábra Képernyőkép innen: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

8.2. ábra Képernyőkép Hansen és Karecha (2025) munkájából 1. ábra
<https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>

8.1. táblázat Képernyőkép a 12.12. táblázat 1. oszlopáról, IPCC AR6 Munkacsoport I. jelentése

9.1. ábra Képernyőkép Taylor és Schlenker (2021) munkájából 1. ábra, <https://www.nber.org/papers/w29320>

9.2. ábra Képernyőkép McKittrick (2025) munkájából 1. ábra, <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>

10.1. ábra: Képernyőkép Pielke (2024) munkájából <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0> 3.
ábra: 10.2. ábra: Képernyőkép Gasparini et al. munkájából (2015) 2. ábra, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)

11.1. ábra: Képernyőkép Pielke Jr.-tól (2023). <https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>

11.2. ábra: Képernyőkép CEA-OMB-től (2023) <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf> 1. ábra.

A SZERZŐKRŐL

John Christy PhD a Huntsville-i Alabamai Egyetem Légkör- és Földtudományok Tanszékének kitüntetett professzora, valamint Alabama állam klimatológusa. Matematika szakon szerzett BA diplomát a Fresno-i California State University-n, MSc-t és PhD-t a Champaigni Illinois-i Egyetemen. Az Amerikai Meteorológiai Társaság tagja, és a NASA Kivételes Tudományos Teljesítményért járó Érem kitüntetésének birtokosa, ugyanis Dr. Roy Spencerrel együtt poláris pályán keringő műholdakról ők állították elő az első globális légköri hőmérsékleti adatsort. Ő volt a 3. IPCC Értékelő Jelentés (AR3, 2001) vezető szerzője: Társszerzője volt az amerikai NAS (Nemzeti Tudományos Akadémia) felszínhőmérséklet-rekonstrukciókról szóló szakértői jelentésének (2006), és tagja volt a NOAA Klímaváltozás Tudományos Programjának, a NASA Földtudományi Albizottságának, az amerikai Nemzeti Kutatási Tanács Űrkutatási Testületének és az USA Környezetvédelmi Hatóság (EPA) Tudományos Tanácsadó Testületének. Mindemellett Dr. Christy 20 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Judith Curry PhD a Georgia Institute of Technology nyugalmazott professzora, ahol 13 évig a Föld- és Légkörtudományi Tanszék vezetője volt. A Climate Forecast Applications Network (CFAN) elnöke és társalapítója. Geofizikából doktorált a Chicagói Egyetemen. 192 lektorált publikáció szerzője vagy társszerzője a légkör- és éghajlattudományok területén. Két tankönyv, valamint legutóbb a *Climate Uncertainty and Risk* című könyv szerzője. Curry tagja az Amerikai Meteorológiai Társaságnak, az Amerikai Tudományfejlesztési Társaságnak, az Amerikai Geofizikai Uniónak, valamint az Amerikai Tudományos és Irodalmi Akadémiának. Tagja volt a Globális Éghajlatkutatási Program számos tudományos irányító bizottságában, valamint az Energiaügyi Minisztérium Biológiai és Környezeti Kutatási Tanácsadó Bizottságában, a NASA Tanácsadó Testületének Földtudományi Albizottságában, valamint az NRC Űrkutatási Tanácsában és az Éghajlatkutatási Bizottságban. Dr. Curry 13 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Honored (Nagytiszteletű) **Steven E. Koonin PhD** a Stanford Hoover Intézetében a „Teller Ede vezető munkatárs” cím birtokosa. Tudományügyi helyettes államtitkár volt az Energiaügyi Minisztériumban (2009-2011), vezető kutató a British Petroleumnél (2004-2009), valamint professzor a Caltech-en (1975-2004, ebből az elmúlt kilenc évben alelnök és igazgató). Koonin tagja a Nemzeti Tudományos Akadémiának és a JASON kormányzati tanácsadó csoportnak. A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium kormányzója, hasonló tisztségeket töltött be a Los Alamos, a Sandia, a Brookhaven és az Argonne nemzeti laboratóriumokban. Korábban egyetemi professzorként dolgozott a New York-i Egyetemen, nem rezidens vezető munkatársként az American Enterprise Institute-ban, valamint a Védelmi Elemzések Intézetének kuratóriumi tagjaként. Koonin fizika szakon szerzett BSc diplomát a Caltech-en, elméleti fizikából pedig PhD fokozatot a Massachusetts Institute of Technology-n. Ő a 2021-es bestseller, az *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, az 1985-ös *Computational Physics* című tankönyv, valamint a fizika, az asztrofizika, a tudományos számítás, az energiatechnológia és -politika, valamint a klímatudomány területén mintegy 200 lektorált cikk szerzője. (Az *Unsettled-et Tisztázatlan: Amit az éghajlattudomány mond, amit nem mond, és mindez miért fontos* címmel 2023-ban magyarul is megjelent.)

Ross McKittrick PhD a kanadai Ontario állambeli Guelph Egyetem környezetgazdaságtan professzora. Közgazdaságtanból BA diplomát a Queen's Egyetemen, MA és PhD fokozatot pedig a British Columbia Egyetemen szerzett. Éghajlatváltozással, szennyezéssel és közpolitikával kapcsolatos témákban széleskörű publikációs tevékenységet fejtett ki mind közgazdaságtudományi, mind fizikai folyóiratokban. Könyvét, a *Economic Analysis of Environmental Policy*-t, a University of Toronto Press adta ki 2010-ben. Az alkalmazott statisztikában szerzett ismeretei arra késztették, hogy lektorált cikkek szerzője, illetve társszerzője legyen a fizikai tudományok széles skáláján, beleértve a

paleoéghajlat rekonstrukcióját, a malária terjedését, a felszínhőmérséklet mérését, az éghajlati attribúció (oktulatájdónítás) módszertanát és az éghajlati modell értékelését. McKittrick professzor világszerte számos meghívásos tudományos előadást tartott. Meghívott közreműködő volt a Nemzeti Tudományos Akadémia 2006-os felszínhőmérséklet-rekonstrukcióról szóló jelentésében, szaklektorként szolgált a három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben (I. és II. munkacsoport), és tanúvallomásokat tett az Egyesült Államok Kongresszusa, valamint a kanadai alsóház és szenátus bizottságai előtt.

Roy W. Spencer PhD vezető kutató az Alabamai Egyetemen, Huntsville-ben. Légmű- és Óceántudományi BSc diplomát a Michigani Egyetemen szerzett, MSc és PhD fokozatát meteorológiából a Wisconsin-Madison Egyetemen kapta. Spencer tudományos publikációi az időjárási folyamatok és az éghajlatváltozás Föld körül keringő műholdakról történő megfigyelésre, valamint az éghajlati érzékenység és az éghajlati visszacsatolások diagnosztizálására szolgáló egyszerű fizikai modellek használatára összpontosítottak. A NASA klímakutatásokért felelős vezető kuitatójaként az Aqua műhold ún. Fejlett Mikrohullámú Pásztázó Radiométer (AMSR-E) amerikai tudományos csoport vezetőjeként szolgált. Ez a tengerfelszín-hőmérsékletéről, a tengeri jégről és az éghajlati rendszer számos egyéb jellemzőjéről a lehető legpontosabb globális mérési eredményeket szolgáltatotta. Dr. John Christyvel együtt Spencer fejlesztette ki az első műholdas technikát a globális hőmérséklet-megfigyelésre, amiért megkapták a NASA Kivételes Tudományos Teljesítmény Érmét és az Amerikai Meteorológiai Társaság különdíját.

Fordítás:

Szarka László Csaba, a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoport elnöke,

Kocsis Ferenc, Király József, ...

2025. augusztus 14.

Lektorálás: folyamatban (Kiss Ádám, Bársony István, ...)

From: Szarka László <szarka@ggki.hu>
Sent: Friday, August 15, 2025 9:01 AM
To: curry.judith@gmail.com; steven.koonin@gmail.com; christy@nsstc.uah.edu;
roy.spencer@nsstc.uah.edu; ross.mckitrick@gmail.com
Subject: Hungarian translation of the DOE Climate Report
Attachments: TELJES_FORDITAS_2025_08_14.pdf

curry.judith@gmail.com
steven.koonin@gmail.com
christy@nsstc.uah.edu
roy.spencer@nsstc.uah.edu
ross.mckitrick@gmail.com

Dear Authors!

On behalf of the Hungarian "climate and energy" scientific community (which primarily includes the Energy Working Group of the Batthyány Society of Professors but also the Hungarian signatories of Clintel' WCD), I would like to express my great gratitude for the groundbreaking climate report that you have prepared: A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate.

Short excerpts (the introductions and chapter summaries) have already been published in my translation by a Hungarian weekly magazine (<https://demokrata.hu/tudomany/a-szen-dioxid-nem-ellenseg-hanem-barat-1036812/>). This magazine has published interviews with among others Richard Lindzen and Samuel Furfari).

The Hungarian translation of the full report is now complete. Attached I am sending the version that is still under review. I will send it as a working document to Hungarian colleagues. I am uncertain about the issue of online publishing the Hungarian version, because it is stated at the beginning of the report that "This report is disseminated by the Department of Energy". I respectfully ask if there is any obstacle for us (Batthyány Society of Professors, PBK) this Hungarian translation on our website? We would like to shape the thinking of the Hungarian public, and the decision makers, of course.

I would like to offer the DOE to publish the report in Hungarian (and then perhaps the final version) I am aware, I can write a letter to an official address (DOEGeneralCounsel@hq.doe.gov), but before that I would like to ask for your opinion, and, if possible, your consent.

The President of the Hungarian Academy of Sciences has made a verbal promise that the Hungarian Academy of Sciences is willing to organize a climate debate that will include both pro and con views. In this context I respectfully ask if there is a chance that you would be able to come to Hungary this year or next year

Yours sincerely:

László Csaba SZARKA, Geophysicist, Member of the Hungarian Academy of Sciences,
Chair of the PBK Energy Working Group, Clintel Ambassador, Hungary

Co-author of two articles cited in the DOE report (Connolly et al. 2021 and Soon et al 2023), and reviewer of the Hungarian edition of Koonin's "Unsettled"

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata

Az USA energiaügyi minisztere számára amerikai klímakutatók által a klímaváltozás „oktulatádonításáról” készített jelentés magyar fordítása

Bevezető a magyar változathoz

Az Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma megbízására öt neves kutató újraértékelte az energetikai zöldátállás klímaváltozási megokolásának alapjait. A mintegy 150 oldal terjedelmű, gyökeres szemléletváltozásról tanúskodik. (Link: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE_Critical_Review_of_Impacts_of_GHG_Emissions_on_the_US_Climate_July_2025.pdf).

E magyar fordítás a 2025. július 23-ai keltezésű USA-dokumentumot (a miniszteri előszót, a vezetői összefoglalót, a szerzők (John Christy, Judith Curry, Steven Koonin, Ross McKittrick, Roy Spencer) által írt bevezetőt, valamint a dokumentum tizenkét fejezetét is tartalmazza).

A világban ma uralkodó nézet szerint a jelenlegi klímaváltozást – a felmelegedést és az időjárási szélsőségek fokozódását – az légköri üvegházgáz-koncentráció emelkedése okozza, aminek fő oka az emberi CO₂-kibocsátás. A klímaegyezményeken keresztül az országok többsége elfogadta, hogy a CO₂-kibocsátást a légköri üvegházgáz-koncentráció további növekedésének megállítása, majd későbbi csökkentése, ezáltal a klímaváltozás jövőbeli mérséklése érdekében korlátozni kell. A klímaegyezményben résztvevő országok arra is kötelezték magukat, hogy előkészítik az egyének, a közösségek, az élőhelyek, a létesítmények és összességében a társadalom alkalmazkodását, hogy a megváltozó klíma hatásai kevésbé legyenek negatívak. Ez az ENSZ, a Világgazdasági Fórum, az Európai Unió „hivatalos” világnézete.

A fenti gondolatmenet egyes lépéseivel és egészével kapcsolatban kezdettől fogva fogalmazódtak meg jogos tudományos kritikák, mégis nagyon sokan elfogadják (nemzetközi szinten és Magyarországon egyaránt). Ma, a 2020-as évek közepén, a dekarbonizáció erőltetett fázisában újra elkezdett nőni azok száma, akik – észlelve az energiaátállás költségeit és csapdáit – megkérdőjelezzik az erőltetett zöldátállást, ugyanakkor elfogadják, hogy a földi léghajlatot az ember „tönkretette”. Végül vannak olyan következetes gondolkodók (például a holland Clintel, a német EIKE, a brit GWPF, Magyarországon többek között a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoportjának természettudományi-műszaki tagjai vonzáskörében), akik képesek a vitatott kérdéseket rendszerbe foglalni, és megalapozott ellenvéleményüket hangoztatni. Mindez azonban mindeddig Don Quijote-i küzdelemnek, falra hányt borsónak tűnt.

Örvendetes, sőt valóságos csodaszámba megy, hogy az USA energiaügyi minisztere számára készített amerikai tanulmány nem frázisokat puffogat, hanem higgadtan érvel. A szerzőtársak óvatosan, körültekintően fogalmaznak (különösen a vezetői összefoglalóban), mégis ízekre szedik a dogmát (és anélkül, hogy a CO₂ szerepét alapjaiban megkérdőjeleznék).

Az amerikai tanulmány világszerte – így remélhetőleg Magyarországon, többek között a Magyar Tudományos Akadémián is – új lendületet adhat az energetikai zöldátállásról, a klíma-energia-környezet összetett kérdésköréről folyó, nagyon is szükséges tudományos vitáknak.

A címloldal magyar fordítása:

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó hatásainak kritikai felülvizsgálata

Jelentés Christopher Wright amerikai energiaügyi miniszter számára
2025. július 23.

Klímaváltozási Munkacsoport:

John Christy, PhD

Judith Curry, PhD

Steven Koonin, PhD

Ross McKittrick, PhD

Roy Spencer, PhD

Ezt a jelentést az Energiaügyi Minisztérium terjeszti. Mint ilyen, e dokumentum a 2001-es költségvetési évre vonatkozó kincstári és általános kormányzati előirányzatokról szóló törvény (106-554. számú közjog) 515. szakaszának és az Energiaügyi Minisztérium által kiadott információminőségi irányelveknek megfelelően készült.

Copyright © 2025 Egyesült Államok

Javasolt hivatkozás:

Klímaváltozási Munkacsoport (2025): Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata. Washington DC: Energiaügyi Minisztérium, 2025. július 23.

A Jelentés tartalomjegyzéke:

MINISZTERI ELŐSZÓ

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

BEVEZETŐ

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐANYAG

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

2.1 A CO₂ MINT A GLOBÁLIS ZÖLDÜLÉSHEZ HOZZÁJÁRULÓ TÉNYEZŐ

2.1.1 A globális zöldülés mérése

2.1.2 Fotoszintézis és CO₂-szint

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

2.2 A LÚGOS ÓCEÁNOK

2.2.1 A pH változása

2.2.2 Korallzátony-változások

3 AZ EMBER HATÁSA AZ ÉGHAJLATRA

3.1 A SUGÁRZÁSI KÉNYSZER ÖSSZETEVŐI ÉS TÖRTÉNETÜK

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

3.2 JÖVŐBENI KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYVEK ÉS A SZÉNCIKLUS

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

3.2.2 A kibocsátásokhoz és koncentrációkhoz kapcsolódó szénciklus

3.3 AZ URBANIZÁCIÓ HATÁSA A HŐMÉRSÉKLETI TRENDRE

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

4.1 BEVEZETÉS

4.2 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG MODELLALAPÚ BECSLÉSE

4.3 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG ADATALAPÚ BECSLÉSE

4.4 TRANZIENS KLÍMAÉRZÉKENYSÉG

5 ELTÉRÉSEK A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

5.1 BEVEZETÉS

5.2 FELSZÍNI MELEGEDÉS

5.3 TROPOSZFÉRIKUS MELEGEDÉS

5.4 ELTÉRÉSEK A FÜGGŐLEGES HŐMÉRSÉKLET-PROFIL MENTÉN

5.5 SZTRATOSZFÉRIKUS HŰLÉS

5.6 ELTÉRÉSEK A HÓTAKARÓBAN

5.7 A PLANETÁRIS ALBEDÓ FÉLGÖMBI SZIMMETRIÁJA

5.8 AZ USA KUKORICAÖVEZETE

6. SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

6.1 BEVEZETÉS

6.2 HURRIKÁNOK ÉS TRÓPUSI CIKLONOK

6.3 HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

6.3.2 Hőközöb-tüllépések

6.3.3 Hőhullámok

6.4 SZÉLSŐSÉGES CSAPADÉK

6.5 TORNÁDÓK

6.6 ÁRVÍZEK

6.7 SZÁRAZSÁG

6.8 FUTÓTÜZEK

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

7.1 GLOBÁLIS TENGERSZINT-EMELKEDÉS

7.2 AZ USA TENGERSZINT-EMELKEDÉSE

7.3 A VÁRHATÓ TENGERSZINT-EMELKEDÉS

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

8.1 BEVEZETÉS

8.2 OKTULAJDONÍTÁSI MÓDSZEREK

8.3 A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS OKTULAJDONÍTÁSA

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

8.3.3 Idősoros módszerek

8.4 CSÖKKENŐ BOLYGÓALBEDO ÉS A LEGUTÓBBI REKORMELEGEDÉS

8.5 AZ ÉGHAJLATI HATÓTÉNYEZŐKRE VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6 SZÉLSŐSÉGES ESEMÉNYEKRE (EEA) VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6.1 Esettanulmány – a 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

9.1 ÖKONOMETRIAI ELEMZÉSEK

9.2 A CO₂-DÚSULÁS TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI ELEMZÉSE

9.3 TERMÉSMODELLEZÉSI METAELMÉZÉSEK

9.4 A CO₂-TRÁGYÁZÁS ÉS A TÁPANYAGVESZTÉS

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

10.1 TÁRSADALMI-GAZDASÁGI HÁTTÉR

10.2 AZ ADATOK ÁLTAL JELENTETT KIHÍVÁSOK

10.3 HALÁLOZÁS A HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK MIATT

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

11.1 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS GAZDASÁGI NÖVEKEDÉS

11.1.1 Áttekintés

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adatalapú elemzése

11.2 MODELLEK A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGÉRE (SCC)

11.2.1 Az SCC becslése

11.2.2 Az SCC változásai

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

11.2.4 Fordulópontok

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

12.1 A LÉPTÉKPROBLÉMA

12.2 ESETTANULMÁNY: AZ USA-GÉPJÁRMŰVEK KIBOCSÁTÁSA

12.3 ZÁRÓGONDOLATOK

SZÓJEGYZÉK

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

A SZERZŐKRŐL

MINISZTERI ELŐSZÓ

Az energia, az integritás és az emberi potenciál ereje

Egész életem során kiváltságos helyzetben volt részem: számos területen dolgozhattam energiaipari vállalkozóként (atomenergia, geotermikus energia, földgáz és egyebek), jelenleg pedig Donald Trump elnök alatt szolgálok energiaügyi miniszterként. De mindenekelőtt fizikus kutató vagyok, aki a modern energiát csodás kincsnek tekinti. Ez hajtja a modern élet minden területét, mozgatja az összes iparágat, Amerikát olyan energianagyhatalommá téve, amely képes a globális fejlődés hajtóerejévé válni.

Az emberiség felvirágzása az elmúlt két évszázadban egy ünneplésre méltó történet. Mégis azt hajtogatják nekünk – megállás nélkül –, hogy azok az energiarendszerek, amelyek lehetővé tették ezt a fejlődést, immár létünket fenyegetik. Érvelésük szerint a szénhidrogén alapú üzemanyagokról gyorsan le kell mondani, különben a bolygó pusztulását kockáztatjuk.

E nézet beható vizsgálatot követel. Ebből a célból rendeltem meg a jelentést. Az éghajlatváltozásról és az energiáról jobban átgondolt és tudományosan megalapozott párbeszédet kívánok ösztönözni. Szakmai hátterem birtokában áttekintettem az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) jelentéseit, az Egyesült Államok kormányainak értékeléseit, valamint a tudományos szakirodalmat. Számos klímakutatóval is kapcsolatba léptem, többek között e jelentés szerzőivel is.

Azt tapasztaltam, hogy a média gyakran eltorzíja a tudományt. A klímaváltozásról sokakban egy eltúlzott, illetve hiányos kép alakítanak ki. Az érthetőség és az egyensúly megteremtése érdekében felkértem egy független szakértőkből álló, sokféle szempontot figyelembe vevő csapatot, hogy kritikusan tekintsék át a klímatudomány jelenlegi helyzetét, különös tekintettel az Egyesült Államokbeli viszonyokra.

Nem azért választottam ezeket a szerzőket, mert mindig egyetértünk – egyáltalán nem. Sőt, lehet, hogy ők sem mindig értenek egyet egymással. Hanem a szigorúságuk, a becsületességük és a vitaszínvonal emelése érdekében választottam őket. Nem gyakoroltam befolyást a következtetéseikre. Amit olvasni fognak, az az ő művük, ami az elérhető legjobb adatokon és tudományos értékeléseken alapul.

A jelentést alaposan átnéztem, és úgy vélem, hogy hűen tükrözi a klímatudomány jelenlegi helyzetét. Ennek ellenére számos olvasó meglepődhet a következtetésein – amelyek lényegi módon eltérnek attól, amit a főszó (a mainstream narratíva) állít. Ez annak a jele, hogy a nyilvánosság előtti párbeszéd a tudománytól nagyon távolra került.

A helyes irány eléréséhez nyílt, tiszteletteljes és tájékozott vitákra van szükség. Ezért erről a jelentésről nyilvános véleményeket kérek. Politikai döntéshozatalunk középpontjában a becsületes vizsgálódásnak és a tudományos átláthatóságnak kell állnia.

Az éghajlatváltozás valós, és figyelmet érdemlő kérdés. De nem ez az emberiség előtt álló legnagyobb fenyegetés. Inkább a globális energiaszegénység érdemelne megkülönböztetett figyelmet. Adatok értékelésével foglalkozom, tudom tehát, hogy az emberi életkörülmények javítása a megbízható, megfizethető energiához való hozzáférés bővítésétől függ. Az éghajlatváltozás ugyan kihívást jelent, de nem katasztrófa! Ami ténylegesen veszélyeztetheti az emberi jólétet, az a tényeket mellőző, félelemre építő, félrevezető szakpolitika.

Az energiairányítás új korszakának küszöbén állunk. Ha az innovációt inkább támogatjuk, mint korlátozzuk, Amerika világvezető szerepet tölthet be a tisztább, bőségesebb energia biztosításában – milliárdokat felemelve a mélyszegénységből, erősítve gazdaságunkat és javítva környezetünket.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

E jelentés áttekinti mindazokat a tudományos bizonyosságokat és bizonytalanságokat, amelyek arról szólnak, hogy az antropogén szén-dioxid (CO₂) és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátása miként befolyásolta, vagy fogja befolyásolni az ország (az USA) éghajlatát, a szélsőséges időjárási eseményeket, valamint a társadalmi jólét egyes mutatóit. E kibocsátás egy összetett és változékony szencikluson keresztül megemeli a légköri CO₂-koncentrációt, és a többlet CO₂ egy része évszázadokig fennmarad a légkörben.

A megemelkedett CO₂-koncentráció közvetlenül elősegíti a növények növekedését, globálisan hozzájárulva a bolygó „zöldüléséhez” és a mezőgazdasági terméshozzához [2.1. szakasz, 9. fejezet]. Emellett csökkenti az óceánok lúgosságát (a pH értékét). Lehetséges, hogy káros a korallzátonyokra, bár a Nagy-korallzátony közelmúltbeli felélédeke nem erre utal [2.2. szakasz].

A szén-dioxid egyben üvegházhatású gáz is, melegítő hatást gyakorolva az éghajlatra és az időjárásra [3.1. szakasz]. Az éghajlatváltozással kapcsolatos előrejelzésekhez a jövőbeli kibocsátásról forgatókönyvek szükségeltetnek. Bizonyítékok léteznek arra, hogy a klímahatásokkal foglalkozó szakirodalomban széles körben használt forgatókönyvek a megfigyelt és valószínűsíthető jövőbeli kibocsátási trendeket eltúlozzák [3.1. szakasz].

A világban létező több tucatnyi globális klímamodell édeskevés útmutatást ad arra vonatkozóan, hogy az éghajlat milyen mértékben reagál a megemelkedett CO₂-szintre: ezek szerint a CO₂-koncentráció megduplázódása esetén a földfelszínen az átlagos felmelegedés mértéke 1,8°C és 5,7°C között mozog [4.2. szakasz]. Az adat alapú módszerek alacsonyabb és szűkebb tartományt jeleznek [4.3. szakasz]. A globális klímamodellek az elmúlt évtizedek éghajlatát általában „forró” módon írják le – a valóságot eltúlozó felszíni felmelegedést mutatnak, valamint túl nagy felmelegedéssel felerősödést az alsó és a középső troposzférában [5.2-5.4. szakaszok]. A túlságosan érzékeny modellek és a jövőbeli kibocsátásokra vonatkozó valószínűtlen, szélsőséges forgatókönyvek kombinációja a jövőben vélt felmelegedési előrejelzésekben nagy túlzásokra vezet.

Az Egyesült Államokban a legtöbb szélsőséges időjárási esemény alakulásában nem mutatkozik hosszú távú tendencia. Az USA történelmi adatai nem támasztják alá a hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok gyakoriság- vagy intenzitás-növekedésére vonatkozó állításokat [6.1-6.7. szakaszok]. Ezenkívül az tűzvész-aktivitás változásainak értékelésekor az erdőgazdálkodási gyakorlatot rendszerint figyelmen kívül hagyják [6.8. szakasz]. A globális tengerszint 1900 óta körülbelül 20 centiméterrel emelkedett, de ebben jelentős regionális eltérések vannak, amiket elsősorban helyi szárazföld-süllyedés okoznak; az amerikai parti tengerszint-mérők (mareográfok) mérésösszesítései nem mutatják, hogy a tengerszint-emelkedés egyértelműen nagyobb ütemű lenne, mint amekkora a történelmi átlag [7. fejezet].

Az éghajlatváltozás vagy a szélsőséges időjárási események emberi CO₂-kibocsátásnak való tulajdonítást (az ún. oktatulajdonítást) a természetes éghajlati változékonyosság, az adatok elérhetősége és a modellek eredendő hiányosságai miatt megkérdőjelezhető [8. fejezet]. Ezenkívül az is lehetséges, hogy a naptevékenység 20. század végi felmelegedéshez való hozzájárulása alá lett becsülve [8.3.1. szakasz].

Mind a modellek, mind a tapasztalatok arra utalnak, hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés gazdaságilag minden bizonnyal kevésbé káros, mint azt általában hiszik, és a túlzottan agresszív mérséklési politikák inkább bizonyulhatnak károsnak, mint előnyösnek [9., 10. fejezet, 11.1. szakasz]. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségeit számszerűsíteni próbáló gazdasági kárbecslések rendkívül érzékenyek a kiindulási feltételezésekre, ezért információtartalmuk igen korlátozott [11.2. szakasz].

Az USA politikai intézkedései várhatóan kimutathatatlanul kis közvetlen hatással vannak a globális éghajlatra, és bármilyen hatás csak hosszú időközökkel jelentkezik [12. fejezet]

BEVEZETŐ

E dokumentum keletkezése 2025. március végére vezethető vissza, amikor Wright miniszter összeállított egy független csoportot, hogy jelentés készüljön az energiapolitika-alkotás szempontjából releváns klímatudományi kérdésekről, többek között a közvélekedést megkérdőjelező bizonyítékokról és nézőpontokról. A munka elvégzésébe azzal a feltétellel egyeztünk bele, hogy sem a miniszter, sem az Energiaügyi Minisztérium, sem más kormányzati alkalmazott nem gyakorol szerkesztői felügyeletet. Ezt a feltételt a folyamat során végig betartottuk, és az csoport teljesen függetlenül dolgozott.

A csapat április elején kezdte meg a munkát, május 28-i határidővel, hogy a tervezetet be lehessen nyújtani egy energiaügyi minisztériumi belső felülvizsgálatra. A rövid határidő és az anyag technikai jellege miatt nem tudtunk teljesen átfogó áttekintést adni. Ezért inkább olyan témákra összpontosítottunk, amelyeket a komoly, elismert tudományos szakirodalom is tárgyal; amelyek a feladatunk szempontjából időszerűek; amelyeket a legújabb értékelő jelentések alábecsülnek vagy hiányoznak belőlük; és amelyek a mi kompetenciánkba tartoznak.

Bár a jelentés célja, hogy a nem szakértők számára is érthető legyen, kihagytunk néhány bevezető vagy magyarázó anyagot, ezek másutt könnyen elérhetők. Nem törekedtünk arra sem, hogy áttekintsük a tárgyalt témákhoz tartozó teljes szakirodalmat. Amennyire csak lehetséges volt, a 2020 óta megjelent szakirodalomra összpontosítottunk, és hivatkoztunk az előző IPCC és NCA (nemzeti klímaértékelési) értékelő jelentésekre. Ahol lehetséges volt, 2024-ig terjedő adatokat is felhasználtunk.

Az szerzői team hálás Wright miniszternek a jelentés elkészítésének lehetőségéért, valamint a független tudományos értékelés és a nyílt tudományos vita támogatásáért. Hálásak vagyunk az Energiaügyi Minisztérium (DOE) és a nemzeti laboratóriumi bírálók anonim csapatának is, mert hozzájárultak ahhoz, hogy a végleges jelentés még jobb legyen.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐ ANYAG

Fejezet-összefoglaló

A szén-dioxid (CO₂) sok tekintetben különbözik az úgynevezett szabványos légszennyező anyagoktól (a CAP-októl). Nem befolyásolja a helyi levegőminőséget, és környezeti szinten nincsenek humántoxikológiai következményei. A globális éghajlatra gyakorolt hatása miatt veszik számba lehetséges tényezőként.

Az 1970-es Tiszta Levegő Törvény hat úgynevezett EPA-szabályozás alá eső kritérium szerinti légszennyező anyagot határozott meg: szálló por, talajközeli ózon, kén-dioxid, nitrogén-dioxid, ólom és szén-monoxid. 2007-ben a Legfelsőbb Bíróság kimondta, hogy az üvegházhatású gázok (köztük a CO₂) ugyancsak „szennyező anyagok”, és rájuk is vonatkozik a Tiszta Levegő Törvénye (Mass. kontra EPA, 2007). Bár a „szennyezőanyag” definíciója végső soron jogi kérdés, fontos tudományos különbségek vannak a CO₂ és a kritérium szerinti (szabványos) légszennyező anyagok között. Ez utóbbiak szabályozási ellenőrzés alatt állnak, mivel a koncentrációjuktól függően helyi problémákat okoznak: az embereknek kellemetlenséget (szagot, láthatóság-csökkenést), növényi károsodást, és kellően magas expozíciós szintek esetén toxikológiai hatásokat okoznak. Ezzel szemben a CO₂ szagtalan, nem befolyásolja a láthatóságot, és környezeti szinten nincs toxikológiai hatása. A légkör természetes része, és kulcsfontosságú eleme az emberi és növényi légzésnek. A CO₂ elengedhetetlen a növényi fotoszintézishez, magasabb szintje pedig előnyös a növényzet számára. E tekintetben a CO₂ hasonló a vízgőzhöz.

A kültéri környezet levegője ma körülbelül 430 ppm CO₂-t tartalmaz, ami évente körülbelül 2 ppm-mel emelkedik. Az Egyesült Államok Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala irányelveket ad ki a beltéri munkahelyekre, ahol megemelkedett CO₂-szinttel találkozhatunk, például ahol szárazjeget használnak. A megengedett expozíciós határérték 5000 ppm 8 órán át (OSHA, 2024). Allen et al. (2015) arról számolt be, hogy az irodai fülkékben dolgozók teljesítménye, amikor 1000-1500 ppm feletti CO₂-szintnek voltak kitéve, bizonyos kognitív feladatokban csökkent. E szint jóval magasabb, mint bármely, a 22. század végéig valószínűsíthető kültéri környezeti érték.

A légkörben lévő CO₂ növekvő mennyisége közvetlenül befolyásolja a földi rendszert azáltal, hogy elősegíti a növények növekedését (a globális zöldülés), ezáltal növeli a mezőgazdasági terméshozamot, és semlegesíti az óceán lúgosságát. A CO₂-vel kapcsolatos elsődleges aggodalom azonban az üvegházgázként (ÜHG) betöltött szerepe, amely megváltoztatja a Föld energiaegyensúlyát, felmelegíti a bolygót. Az, hogy az éghajlat hogyan reagál erre a hatásra, egy összetett kérdés, ez tölti ki a jelentés nagy részét.

Hivatkozások

- Allen, J., Macnaughton, P., Satish, U., et al. (2015). A kognitív funkciók pontszámainak összefüggései a szén-dioxid-, a szellőztetés- és az illékony szerves vegyületek expozíciójával irodai dolgozóknál: Kontrollált expozíciós vizsgálat zöld és hagyományos irodai környezetekben. *Környezeti egészségügyi perspektívák*. 124. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Massachusetts kontra Környezetvédelmi Ügynökség, 549 U.S. 497 (2007). <https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120>
- USA Környezetvédelmi Ügynökség. (é.n.). Kritériumok a légszennyezőkre. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- USA Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala. (2024). OSHA foglalkozási vegyi adatbázis: Szén-dioxid. <https://www.osha.gov/chemicaldata/183>

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

Fejezet-összefoglaló

A CO₂ fokozza a fotoszintézist és javítja a növények vízfelhasználási hatékonyságát, ezáltal elősegíti a növények növekedését. A globális zöldülés, amely részben a légkörben megnövekedett CO₂-szintnek köszönhető, mindegyik kontinensen jól kimutatható.

Ha a CO₂ a tengervízben elnyelődik, az óceánok lúgossága csökken. A pH-érték jelenkori csökkenése nem lépi túl az évezredes időléptékben megfigyelhető természetes változékonysági tartományt. Az óceáni élővilág nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak. A pH-csökkenés hátrányosan befolyásolhatja a korallokat, ugyanakkor az ausztrál Nagy-korallzátony az elmúlt években jelentős növekedést mutat.

2.1 A CO₂, mint a globális zöldüléshez hozzájáruló tényező

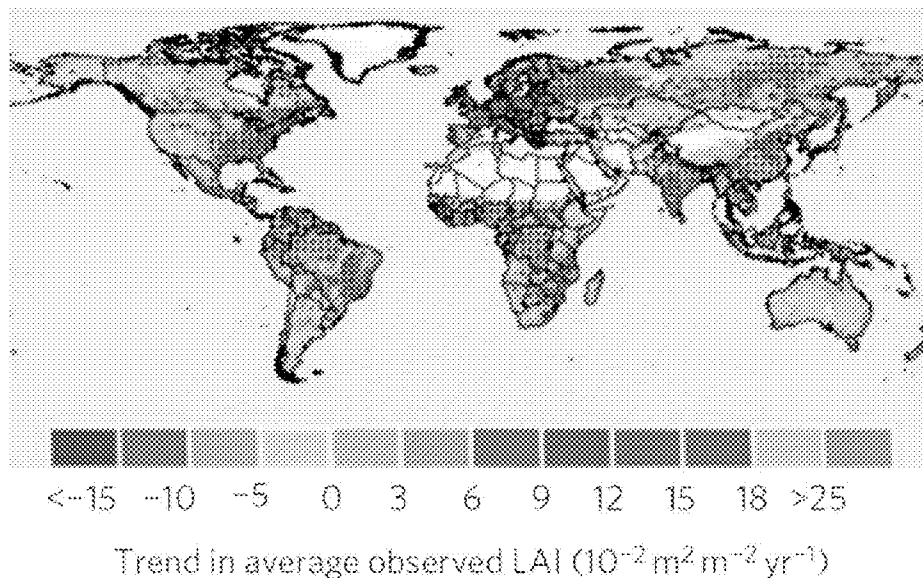
A légkörben az emelkedő CO₂-koncentráció fontos pozitív hatással bír, mivel elősegíti a növények növekedését a fotoszintézis fokozásával és a vízfelhasználás hatékonyságának javításával. Ami megnyilvánul az alábbiakban tárgyalt „globális zöldülés” jelenségében, valamint a 10. fejezetben tárgyalt javuló mezőgazdasági hozamokban is. Itt csak a CO₂-trágyázásra összpontosítunk; a hőmérséklet- és csapadékváltozások együttes hatásainak kutatását a 10. fejezet tárgyalja.

2.1.1 A globális zöldülés mérése

A „zöldülés” a földfelszín növényzettel borított részarányának növekedését jelenti. A műholdakkal mért „levélfelület-index” (LAI) segítségével számszerűsíthető is. Az elmúlt évtized során számos tanulmány erősítette meg a globális zöldülési mintázatot (LAI növekedés), amely részben az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonítható. Zhu et al. (2016) az elsők között voltak, akik arról számoltak be, hogy a globális zöldülés műholdas érzékelők segítségével kimutatható. 1982 és 2011 között a Föld területének 25-50 százalékán észleltek zöldülést, szemben a mindössze négynél alig több százaléknyi „barnulással”, és a zöldülés 70 százalékát az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonították (lásd a 2.1. ábrát). További hozzájárulási tényezőt jelent a földhasználat változása, a felmelegedés és a nitrogén. A CO₂-nek tulajdonítható részarány a trópusokon volt a legnagyobb; a CONUS-ban (az USA területileg összefüggő államaiban) egyéb tényezők játszottak dominánsabb szerepet.

Zeng et al. (2017) megerősítette a zöldülés mintázatát, megjegyezve, hogy a globális levélfelületet harminc év alatt 8 százalékkal növekedett, és hogy a zöldülés mérsékelte a felmelegedést. A zöldülést világszerte megfigyelték. Chen et al. (2019) kimutatták, hogy Kínában és Indiában ennek a nagy részét földgazdálkodási változások okozzák. Így, míg Kína a globális növényzeti területnek csak 6,6 százalékát teszi ki, a LAI globális nettó növekedésében 25 százalékot tesz ki. Piao et al. (2020) megjegyezték, hogy a zöldülés még az Arktiszon is megfigyelhető. A CO₂-trágyázás hatásait befolyásolja a helyi hőmérséklet, valamint a tápanyagok és a víz rendelkezésre állása, amelyek mindegyike regionálisan változik.

Míg a növénymodellek az emelkedő CO₂-szintre válaszként a fotoszintézis növekedését jósolják, Haverd et al. (2020) a modellelőrejelzéseknél sokkal nagyobb CO₂-trágyázási arányról számoltak be. Vagyis a CO₂-trágyázás 1900 óta 30 százalékkal növelte a megfigyelt globális fotoszintézist, szemben a növénymodellek által előrejelzett 17 százalékkal. Ha ez igaz, az arra utalna, hogy az emelkedő CO₂ társadalmi-gazdasági hatásainak globális modelljei alábecsülték a növényekre és a mezőgazdaságra gyakorolt előnyöket. Keenan et al. (2023) azonban alacsonyabb trágyázási arányt becsülték, ami jobban összhangban van a modellekkel. A CO₂-trágyázás és a mezőgazdaság közötti kapcsolatot a 9. fejezetben tárgyaljuk.



2.1. ábra: Az átlagos Levélfelületi Index (LAI). Forrás: Zhu et al. 2016, 3. ábra. A LAI dimenzió nélküli mennyiség, amely a növényi lombkorona levélfelületének nagyságát írja le a talajfelülethez viszonyítva.

Piao et al. (2020), valamint Chen et al. (2024) arról számolnak be, hogy a zöldülési trend folytatódik, nincsenek lassulási jelek, és továbbra is a CO_2 -trágyázás a domináns hajtóerő.

2.1.2 Fotoszintézis és CO_2 -szint

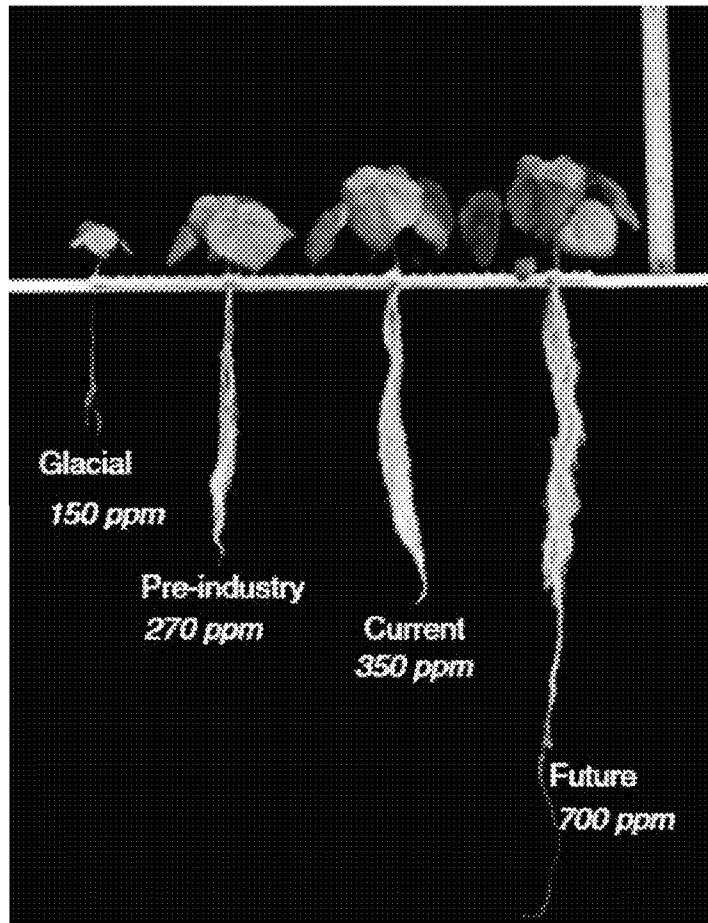
A növények fotoszintézissel építik fel a biomasszákat, amely folyamat a szén-dioxidot, a vizet és a fényt cukorrá alakítja. A fotoszintézisért felelős növényi enzim a ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz/oxigenáz vagy „Rubisco”. A fotoszintézis akkor indul be, amikor CO_2 a Rubisco enzim felületén rendelkezésre áll, ahol 3 szénatomos molekulává alakul, majd beépül a növény tömegébe. Ezt „C3” folyamatnak nevezik.

A Rubisco enzim becslések szerint körülbelül 3 milliárd évvel ezelőtt fejlődött ki. A geológiai idők során a Föld légkörének CO_2 -szintje általában sokszorosa volt a mai értéknek. Körülbelül 400 millió évvel ezelőtt a CO_2 -szint becslései szerint 2000-4000 ppm volt, a 200 és 50 millió évvel ezelőtti időszak nagy részében pedig 1000 ppm vagy annál magasabb (Berner 2006, Judd et al. 2024). A legutóbbi 35 millió évben a légköri CO_2 -szint folyamatosan csökkent, a eljegesedések idején akár 170 ppm-re is visszaesett (Gerhart és Ward 2010). Bár a CO_2 jelenkori változásának üteme a korábbi időszakokéhoz képest magas lehet, geológiai bizonyítékok szerint a növények és az állatok a jelenleginél sokkal magasabb CO_2 -szint mellett fejlődtek ki.

Az alacsony CO_2 -szintre válaszul egyes növények a fotoszintézisre egy másik módot, az ún. C4-et fejlesztettek ki, amelyben a CO_2 a Rubisco közelében koncentrálódik, lehetővé téve a C3 folyamat hatékonyabb működését. Mezőgazdasági célokra a növénykategóriák a következők:

- C3: rizs, búza, szójabab és a legtöbb más növény
- C4: kukorica, cukornád, köles, cirok

A a légköri CO_2 -szint további csökkenése esetén a növényi növekedés lelassult volna, majd végül leállt volna. 180 ppm alatt számos C3 faj növekedési üteme a 350 ppm-hez képest (40-60 százalékkal csökken (Gerhart és Ward 2010), és a növekedés 60-140 ppm CO_2 -koncentrációjú kísérleti körülmények között teljesen leállt. Egyes C4 növények még 10 ppm-es CO_2 -szinten is képesek növekedni, bár nagyon lassan (Gerhart és Ward 2010).



2.2 ábra: A sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) 14 nap alatti növekedése, miközben az összes többi kísérleti körülmény a CO₂-szint kivételével megegyezett. Forrás: Gerhart and Ward (2010). A képen a "Current" (jelenlegi) szint 1988-nak felel meg.

A jelenlegi CO₂-szint körülbelül 430 ppm, szemben az 1800-as évek eleji 280 ppm-mel. A növények pozitív reakcióját a CO₂-többletre a 2.2. ábra szemlélteti, Gerhart és Ward (2010) munkájából reprodukálva. Az ábra a CO₂ növekedési hatását mutatja a sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) palántákra 14 nap alatt, kontrollált körülmények között, ahol csak a CO₂-kitettség változik. A CO₂ 150 ppm-ről 350 ppm-re történő emelésével elért nyereség a 700 ppm-re való további megduplázódás esetén is folytatódik. A legutóbbi több mint 60 évben a növekvő CO₂-szintre adott növényi válaszról több ezer tanulmány készült. A legfontosabb kutatási téma az, hogy a növények, különösen a C3 növények, profitálnak a többlet CO₂-szintből. A CO₂ két mechanizmus révén biztosít növekedési előnyt:

- A fotoszintézis fokozódása a fent leírt anyagcsere-módokon keresztül.
- A vízfelhasználási hatékonyság megnövekedett. Ez azért történik, mert a növények a levél felszínén lévő gázcserenyílások (pórusok) kinyitásával vonják be a CO₂-t. Amikor a CO₂ szűkösen áll rendelkezésre, a gázcserenyílásokat hosszú ideig kell tágra nyitva tartani, hogy a víz elpárologhasson. CO₂-ben dús körülmények között a gázcserenyílások hosszabb ideig maradnak zárva, így segítve a növényt a víz hosszabb ideig történő megtartásában, ezáltal növelve a vízfelhasználási hatékonyságot. A klímaváltozás amerikai mezőgazdaságra gyakorolt konkrét hatásait a 9. fejezetben tekintjük át.

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

Derying et al. (2016) áttekintették a növények vízhozamát (CWP), azaz a hozam/felhasznált víz arányra vonatkozó bizonyítékokat, ráirányítva a figyelmet arra, hogy a CO₂ képes a fotoszintézis fokozására és a levélszintű párologtatás csökkentésére (a levéllégzés során a vízvesztés csökkentésére). Felmérték az összes rendelkezésre álló FACE-adatot (szabadlevegős CO₂-dúsulást – ld. 9. fejezet) a kukorica, a búza, a rizs és a szója terméshozam-változásairól, és kombinálták azokat a 2080-as állapotra vonatkozó terméshozam-válaszokat szimuláló növénymodell-adatokkal a szélsőséges RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv szerint négy termesztő régióban (trópusi, száraz, mérsékelt és hideg), amelyek mindegyikét esővel öntözött és mesterségesen öntözött alrégiókra osztották. Jelentésük szerint a CO₂-trágyázás nélküli modellek minden régióban CWP-vesztéset jósoltak, de ezeket a CO₂-trágyázás bőven ellensúlyozta, így minden régió nettó CWP-növekedést mutatott. Derying et al. (2016) arról is beszámolt, hogy a felmelegedés búza- és szójababhozamokra gyakorolt negatív hatásait teljes mértékben ellensúlyozta a CWP-növekedés. A rizs esetében a mitigáció akár 90%-osnak, a kukorica esetében pedig 60%-osnak bizonyult.

Hasonlóképpen, Cheng et al. (2017) megjegyezte, hogy az 1982 és 2011 között a növekvő CO₂-megkötés miatt megnövekedett bruttó elsődleges termelés (GDP) olyan nagymértékű nyereséggel járt együtt a növényzet vízfogyasztásában (CWP), hogy a növények globális vízfelhasználása a többlet biomassza ellenére sem nőtt.

Derying et al. (2016) azt feltételezte, hogy a klímaváltozás „súlyosbítja a vízhiányt”. Míg a modellek azt jósolják, hogy a felmelegedés hatására a száraz területek nagysága nő, a jelenlegi adatok az ellenkezőjét mutatják: még a száraz területek is zöldülnek. Zhang et al. (2024) arról számolnak be, hogy a megnövekedett CO₂-szint miatt „a száraz területek fokozódó szárazsága nem vezet a növényzet termőképességének általános csökkenéséhez”; a jelenleg száraz területeknek legfeljebb csak 4 százalékan fog fokozódni az elsivatagosodás.

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

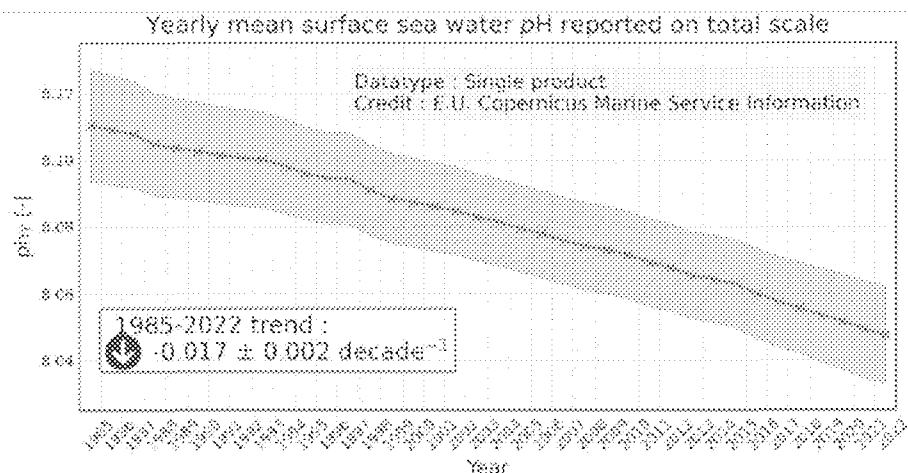
Az IPCC alig foglalkozik a globális zöldüléssel és a mezőgazdasági növények CO₂-trágyázásával. A téma röviden említésre kerül az IPCC 6. és korábbi értékelő jelentéseinek törzsében, de az összes összefoglaló dokumentumból kimarad. Az AR6 I. munkacsoport jelentésének 2.3.4.3.3. szakasza, melynek címe „Globális zöldülés és barnulás”, rámutat, hogy az IPCC klímaváltozásról és földhasználatról szóló különjelentése nagy bizonyossággal arra a következtetésre jutott, hogy a zöldülés az elmúlt 2-3 évtized során globálisan fokozódott. Ezután arra tér rá, hogy a zöldülési trendben eltérések vannak az adathalmazok között, és arra a következtetésre jut, hogy bár nagy bizonyossággal állítják, hogy zöldülés történt, a trend nagyságrendjét alacsony megbízhatóságúnak nevezik. Az AR6 I. és II. munkacsoport jelentéseinek néhány további fejezetében röviden megemlíti a CO₂-trágyázás hatásait és a vízfelhasználás hatékonyságának javulását.

Összességében elmondható azonban, hogy az AR5 és AR6 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalói, a technikai összefoglalók és a szintézisjelentések nem tárgyalják a témát.

2.2 A lúgos óceánok

2.2.1 A pH változása

A semleges vizes oldat pH-ja 7,0, míg a 7,0-nél nagyobb pH-jú oldat lúgos (más néven bázikus), a 7,0-nél kisebb pH-jú pedig savas. A felszíni tengervíz jelenkori globális átlagos pH-értékét 8,04-re becsülik (Copernicus Marine Service 2025, 2.3. ábra), szemben az iparosodás előtti időkben becsült 8,2-es értékkel (Gattuso és Hansson, 2011). Ahogy a légkör CO₂-koncentrációja emelkedett, az óceánok többet nyeltek el, ami csökkentette a pH-értéküket. Az óceánok pufferkapacitásától függően várható, hogy idővel némileg kevésbé lesznek lúgosak, ami összhangban van a pH megfigyelt csökkenésével.

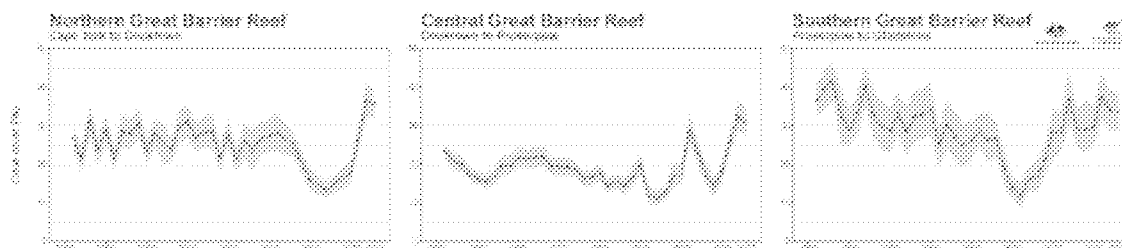


2.3 ábra: Óceáni pH 1985 – 2022. Forrás: Copernicus Marine Service 2025

E folyamatot gyakran „óceáni savasodásnak” nevezik, de ez félrevezető elnevezés, mivel az óceánok várhatóan nem válnak savassá; pontosabb lenne az „óceán semlegesítődése”. Ha a víz savassá válna, akkor is az a vélekedés, hogy az óceánokban az élet akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak, 6,5 és 7,0 közötti pH-értékkel (Krissansen-Totton et al., 2018). Több ezer éves időléptékben a bórízotóp-proxy mérések azt mutatják, hogy az óceán pH-értéke a legutolsó eljegesedés idején (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt) 7,4 vagy 7,5 körül volt, és a mai értékekre emelkedett, ahogy a világ az eljegesedés csökkenése során felmelegedett (Rae et al., 2018). Így az óceáni élőlények ellenállónak tűnnek az óceán pH-értékének természetes hosszú távú változásaival szemben, mivel a tengeri élőlények széles pH-tartománynak voltak kitéve.

2.2.2 Korallzátony-változások

Vannak aggodalmak arra vonatkozóan, hogy a tengervíz pH-értékének csökkenése csökkenti a korallzátonyok kalkifikációs (meszesedési) sebességét. A korallzátonyok azonban már most is nagy pH-ingadozásokat mutatnak, részben a zátonyban zajló napi fotoszintézis-aktivitás miatt; a mért pH-értékek a nappali 9,4-től éjszaka 7,5-ig terjedően változnak (Revelle és Fairbridge, 1957). De’ath et al. (2009) arról számol be, hogy Ausztrália Nagy-korallzátonyának (GBR, a világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája) egy részén 1990 óta 14 százalékos csökkenést tapasztaltak a meszesedésben. Ezt a víz hőmérsékletének emelkedésével és a pH csökkenésével igyekeztek magyarázni. Ridd et al. (2013) azonban kimutatta, hogy ez a jelentés egy elfogult adatelemzés eredménye, amely korrigálva nem mutatott változást a meszesedési arányban. Mindazonáltal az eredeti cikk által kiváltott riadalom továbbra is fennáll, amint azt az eredeti tanulmányra publikált hivatkozások nagy száma (541) is bizonyítja, szemben a javításra vonatkozó dolgozat mindössze 11 hivatkozásával (2025. április 30-i állapot szerint). Az Ausztrál Tengertudományi Intézet legfrissebb éves GBR-körülmeny-összefoglalója szerint a korallzátony-termelékenység erőteljesen fellendült (AIMS, 2023). A 2.4. ábra az AIMS keménykorall-borításra vonatkozó felméréseinek eredményeit mutatja, a zátonyterület százalékában kifejezve. A GBR 2011 előtti csökkenésének nagy része az intenzív trópusi ciklonvékenységnek (Beeden et al., 2015), valamint egy sor tengeri hőhullámnak, mezőgazdasági lefolyásnak és invazív fajoknak tudható be (Woods Hole, 2023). Tekintettel a GBR-meszesedés 1990 és 2009 közötti csökkenésére és a légköri CO₂-szint folyamatos növekedésére, a fellendülés egyes megfigyelőket meglepett.



2.4 ábra: A keménykorall-borítás a Nagy korallzátony három régiójában 1985-től 2023-ig. Forrás: AIMS 2023.

Egyre inkább felismerik, hogy a publikációs torzítás (az óceáni savasodás riasztó eredményei, amelyeket a nagy hatású kutatási publikációk előnyben részesítenek) eltúlozza az óceáni pH-érték csökkenésének hatásait. Az ICES Journal of Marine Science különszáma ezt a problémát egy „Tágabb perspektíva felé az óceánsavasodási kutatásokról” című cikkben tárgyalta. A különszám bevezetőjében H. I. Browman kijelentette: „Ahogy az a tudomány egészére igaz, az olyan cikkeket, amelyek arról számolnak be, hogy az óceáni savasodásnak nincsenek hatásai, jellemzően nehezebb publikálni.” (Browman, 2016).

Hasonlóképpen, az óceáni savasodás zátonyhalak viselkedésére gyakorolt negatív hatásának metaanalízise (Clements et al., 2021) az úgynevezett „csökkenési hatást” találta: a neves folyóiratokban megjelent, kezdetben drámai következtetéseket, amelyek a savasodás látszólag nagy hatásait mutatták, általában nagyobb mintákon végzett későbbi tanulmányok követték, amelyek arról számoltak be, hogy a hatások sokkal kisebb és jellemzően nem is léteznek. Felszólítják kollégáikat, hogy fejlesszék kutatási gyakorlataikat a „hanyatlási hatás” ellensúlyozása érdekében:

E területen a jelentős hatást mutató tanulmányok túlnyomó többségét általában alacsony mintaelemszám jellemzi, mégis nagy impaktfaktorú folyóiratokban jelennek meg, és az idézettség tekintetében aránytalanul nagy szakterületi befolyásra tettek szert. Azt állítjuk, hogy az óceánok savasodásának a halak viselkedésére elhanyagolható közvetlen hatása van, és a jövőbeli kutatási területeken a hanyatlási hatás lehetőségének minimalizálása érdekében jobb megközelítéseket szorgalmazunk (Clements et al., 2021).

Összefoglalva, az óceáni élővilág összetett, és nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok a jelenlegihez képest savasabbak voltak. A modern korallak ősei először körülbelül 245 millió évvel ezelőtt jelentek meg. A CO₂-szint több mint 200 millió évvel később sokszor magasabb volt, mint ma. Az óceánok „savasodásának” a tengeri élővilágra gyakorolt hatásairól szóló nyilvános viták nagy része egyoldalú és eltúlzott volt.

Hivatkozások

AR6: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése (2021) I. Munkacsoport Hozzájárulása. www.ipcc.ch.

Ausztrál Tengertudományi Intézet. (2022). A korallzátonyok folyamatos regenerálódása 36 éves csúcsokat eredményezett a Nagy-korallzátony kétharmadán. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., és Williams, G. (2015). A Yasi súlyos trópusi ciklon hatásai és a felépülés a Nagy-korallzátonyon. PLOS ONE, 10, e0121272. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272>

Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: Kombinált modell a fanerozoikum légköri O₂ és CO₂ vizsgálatára. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5653–5664. 9

- Browman, H. I. (2016). Szervezett szkepticizmus alkalmazása az óceánok savasodási kutatásában. *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), 529.1–536. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., és Myneni, R. B. (2019). Kína és India vezető szerepet tölt be a világ zölddé tételében a földhasználat-gazdálkodás révén. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>
- Chen, X., Wang, Y., Liu, Y. és Piao, S. (2024). A globális zöldülés a 2000 óta fokozódó aszály okozta stressz ellenére is folytatódik. *Global Ecology and Conservation*, 49, e02791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P. et al. (2017). A szárazföldi szénmegkötés közelmúltbeli növekedése a víz körforgására gyakorolt kis költséggel. *Nature Communications*, 8, 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D. és Jutfelt, F. (2022). Metaanalízis extrém „csökkenési hatást” tár fel az óceáni savasodás halak viselkedésére gyakorolt hatásában. *PLOS Biology*, 20(2), e3001511. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511>
- Copernicus Marine Service. (2025). Globális óceáni savasodás – Az átlagos tengervíz pH-értékének idősorai és trendje több megfigyelés újrafeldolgozásból. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- De'ath, G., Lough, J. és Fabricius, K. (2009). Csökkenő korall-meszesedés a Nagy-korallzátonyon. *Science*, 323, 116–119. <https://doi.org/10.1126/science.1165283>
- Daryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... és Elliott, J. (2016). Regionális különbségek a növekvő CO₂-koncentráció jótékony hatásaiban a növényi vízhozamra. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Gattuso, J. P. és Hansson, L. (szerk.). (2011). Óceánok savasodása: Háttér és történelem. Oxford University Press.
- Gerhart, L. M., és Ward, J. K. (2010). Növények reakciói a múltbeli alacsony [CO₂]-szintre. *New Phytologist*, 188, 674–695. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402. <https://doi.org/10.1111/gcb.14950>
- Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, et al. (2023). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change* 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558-023-01867-2.
- Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., et al. (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 385(6715). <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 4105–4110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115>
- Piao, S., X. Wang, T. Park, et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x
- Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., et al. (2018). CO₂ storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. *Nature*, 562, 569–573. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0614-0>
- Revelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology* (Vol. 1). Geological Society of America.

- Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? *Marine Geology*, 346, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002>
- Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/>
- Zeng, Z., Piao, S. Li, L., et al. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate3299>

3 EMBERI ÉGHAJLATI HATÁSOK

Fejet-összefoglaló

A globális éghajlat minden időléptékben természet változások függvénye. Az antropogén CO₂-kibocsátás azáltal járul hozzá ehhez a változékonysághoz, hogy megváltoztatja a légkör teljes sugárzási energiaegyensúlyát.

Az IPCC lekicsinyli a Nap szerepét az éghajlatváltozásban, de léteznek olyan kézenfekvő napsugárzási rekonstrukciók, amelyek szerint a Nap hozzájárulhatott a jelenkori felmelegedéshez.

Az éghajlati előrejelzés („projekció”) az IPCC kibocsátási forgatókönyvein alapul, de ezek trendjei rendre meghaladják a megfigyeléseket. Az elmúlt évek legtöbb éghajlattudományi hatástanulmánya a szélsőséges RCP 8.5 forgatókönyvön alapul. Ezt ma már valószínűtlennek tartják; szokásos üzletmeneti forgatókönyvként való alkalmazása: félrevezető.

A szén ciklus-modellek az éves kibocsátást összekapcsolják a légköri CO₂-készlet növekedésével. A modellek ugyan ellentmondásosak a szárazföldi és óceáni CO₂-megkötés mértékével kapcsolatban, de abban mind egyetértenek, hogy a CO₂-megkötés 1959 óta növekedésben van.

Bizonyítékok léteznek arra, hogy a szárazföldi felmelegedési adatokban megmutatkozó városi torzítást az éghajlati adatsorokból nem távolították el teljes mértékben.

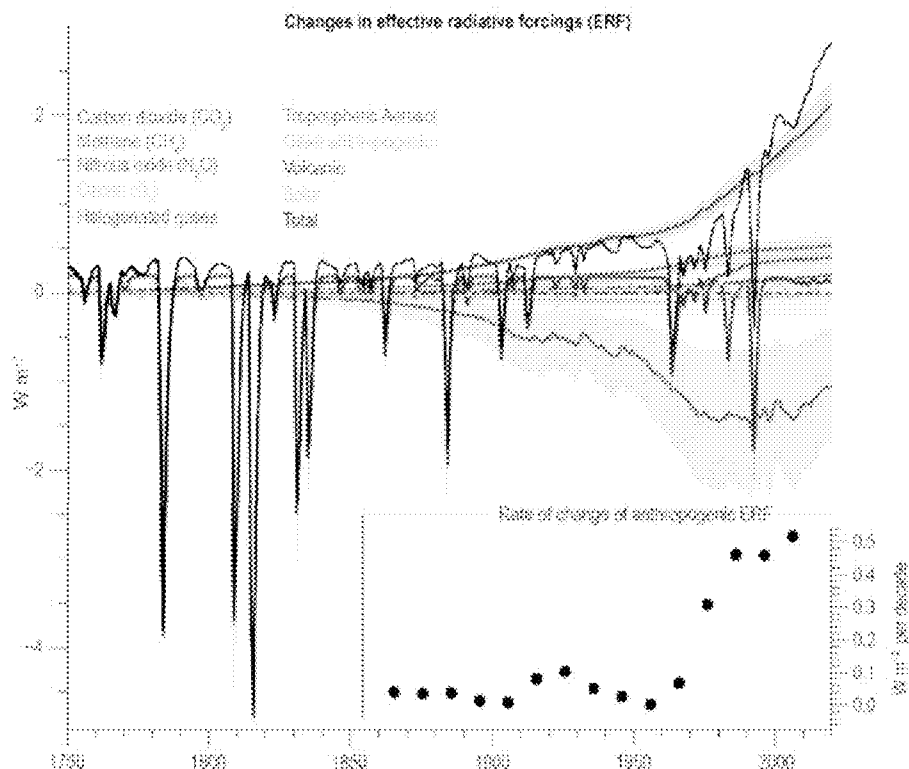
3.1 A sugárzási kényszer összetevői és történeteük

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

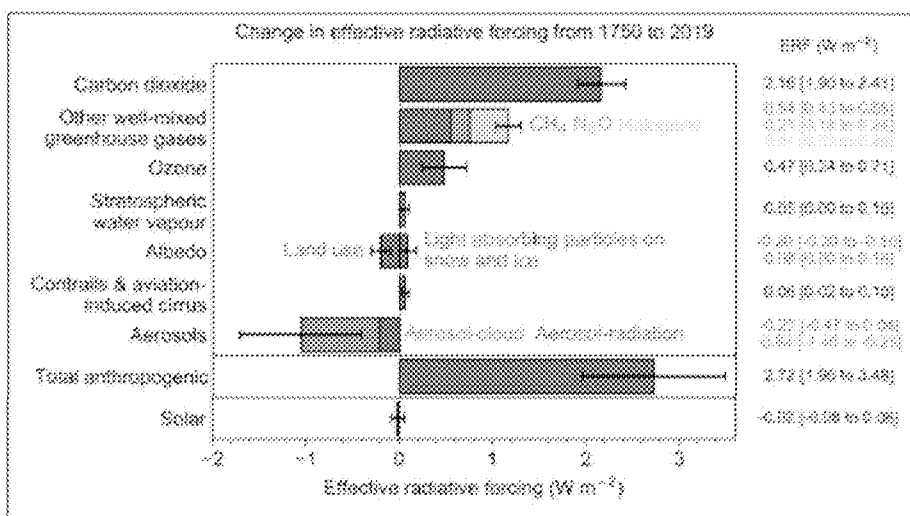
A Föld 4,6 milliárd éves történetében az éghajlatváltozás mindig is jellemző volt. A Föld hőmérséklete és időjárási mintázatai természetes módon változnak évtizedektől több millió évig terjedő időléptékben. A felszíni éghajlat természetes változásai kétféleképpen keletkeznek. A légkörben és az óceánban zajló cirkulációval összefüggő belső éghajlati ingadozások révén a légkör, az óceánok, a szárazföld és a jég között energia, víz- és szén csere zajlik. Az éghajlati rendszerre gyakorolt külső hatások közé tartoznak a Naptól származó energia változásai és a vulkánkitörések hatásai. Az emberi tevékenységek a földhasználat és a föld befedése megváltoztatásával befolyásolják az éghajlatot. Az emberek a légkör összetételét is megváltoztatják a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásával, valamint a légkörben lévő aeroszolrészecskék koncentrációjának változtatásával.

A Földet az elnyelt napfény melegíti, és az űrbe kisugárzott hő hűti. A Föld felszínén átlagolva ezek a folyamatok körülbelül 240 watt/négyzetméter (W/m²) energiaáramlást jelentenek. Amikor egyensúlyban vannak, sem a felmelegedésnek, sem a lehűlésnek nincs nettó külső ok. Mind az emberi, mind a természetes éghajlati hatások megváltoztatják ezt az egyensúlyt, és így az éghajlat megváltozását okozzák.

A Föld légkörének tetején lévő energiaegyensúlyra gyakorolt hatásokat, azaz azt, hogy milyen mértékben keletkezik zavar a felmelegedés/lehűlés egyensúlyában, az ún. „sugárzási kényszer” számszerűsíti; a pozitív kényszer melegít, míg a negatív kényszer hűt. Az IPCC becsült adatai a sugárzási kényszer főbb összetevőinek 1750 óta tartó alakulásáról az AR6 itt bemutatott két ábráján látható.



3.1.1 ábra: A sugárzási kényszer összetevőire vonatkozó becslések időbeli változása. A sátozás a bizonytalansági határt jelzi. Forrás: AR6 WGI 2. fejezet, 10. ábra



3.1.2. ábra: A sugárzási kényszer összetevőinek változása 1750-től 2019-ig az IPCC szerint. Forrás: AR6 WGI 7. fejezet, 7-6. ábra

E grafikonok azt mutatják, hogy a teljes sugárzási kényszer természetes és antropogén összetevőkből tevődik össze. Az éghajlatot az ember leginkább a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával, a szén-dioxiddal befolyásolja. Melegítő hatást fejt ki azáltal, hogy csökkenti a légkör hűtőerejét. A CO₂-kibocsátás felhalmozódik a légkörben, amint azt a következő szakaszban ismertetjük, így a felmelegítő hatás erősödik. Egyéb üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, halogének és ózon) hasonlóan hatnak, így ezek együttesen a CO₂ által jelentett felmelegedéshez

képest további 75 százalékkal járulnak hozzá. Az aeroszolk összességében hűtő hatást fejtenek ki, bár nagy a bizonytalanság abban, hogyan működnek közre katalizátorként a fényvisszaverő felhők kialakulásában. Ennek eredményeként a jelenkori felmelegedés okainak megértéséhez nemcsak a CO₂ melegítő hatásainak azonosítása szükséges, hanem az aeroszolk bizonytalanabb hűtő hatásainak beazonosítása is.

Az IPCC a Nap sugárzási kényszerének változását elhanyagolhatónak becsüli, mivel az iparosodás előtti idők óta a csekély szoláris változást feltételező adatrekonstrukciókat részesítik előnyben. Connolly et al. azonban (2021) a szakirodalomból az 1600-2000 közötti évekre vonatkozóan tizenhat különféle teljes napbesugárzási (TSI) rekonstrukciót gyűjtött össze; a rekonstrukciók a TSI alig változó állapotától egy viszonylag erősen emelkedő tendenciáig terjednek. A szerzők megjegyzik, hogy a TSI-változás és a felszínhőmérséklet-változás rekonstrukcióinak kombinációja lehetővé tesz olyan következtetéseket, ami azzal a feltételezéssel vannak összhangban, hogy a 20. századi felmelegedés egyáltalán nem tulajdonítható a Napnak, de olyat is, hogy nagyrészt a Napnak tulajdonítható.

Különösen nehéz kérdést vet fel a TSI 1989 és 1991 közötti adathiánya, amely egy megfigyelőeszköz felbocsátásának a Challenger űrrepülőgép 1986. január 28-i katasztrófája miatti késedelem folyománya. E késés megakadályozta, hogy a korábbi felváltó új műholdat idejekorán felbocsássák annak érdekében, hogy az előző rendszerrel időben átfedő adatokat szolgáltatson, és a két adatsort egymással hitelesíteni lehessen (Zacharias 2014, Scafetta et al. 2019). Ez az ún. ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) hézagprobléma. Az ugyanis, hogy van-e emelkedő tendencia a TSI-ben 1978 és 2018 között, attól függ, miként pótolják az ACRIM adathiányát. Connolly et al. (2021) megállapította, hogy az IPCC konszenzusos nyilatkozatait a napsugárzási kényszerrel az eltérő tudományos vélemények elnyomásával idő előtt fogalmazták meg.

A sugárzási kényszer egy másik természetes összetevőjét az időnkénti hűtőhatást kifejtő vulkáni aeroszolk jelentik. Az IPCC AR6 jelentés 4.1. tudásdoboz a vulkánkitörések éghajlati hatásával foglalkozik, megemlítve három robbanásszerű vulkánkitörést, amelyek a 19. század első felében történtek. Ezek közé tartozott az 1815-ös Tambora-kitörés, ami a „nyár nélküli évet” eredményezte, és az északi féltekén számos termés kieséssel járt. Bizonytalanság van a 2022-ben kitört Hunga Tonga tengeralatti vulkán által jelentett viszonylag kis sugárzási kényszer előjelével kapcsolatban is (Jenkins et al., 2023, Schoeberl et al., 2024).

A 3.1.1. ábra azt mutatja, hogy a sugárzási kényszer antropogén összetevője 1900 előtt elhanyagolható volt, azóta pedig folyamatosan növekszik, mára közel 3 W/m²-re emelkedett. Ez azonban még mindig csak körülbelül 1 százaléka a zavartalan sugárzási áramnak, ami megnehezíti az antropogén kényszer hatásának elkülönítését; a globális sugárzási energiaáramot a legmodernebb műholdakkal is csak néhány W/m² pontosságban lehet megbecsülni.

A vulkánkitöréseken és a teljes napsugárzáson (TSI) kívül a globális energiaegyensúlyban eltérést okozó egyéb természetes források ezeken a grafikonokon nem szerepelnek, mivel azok nagyrészt ismeretlenek.

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

A szén-dioxid melegítő hatása attól függ, hogy mennyi CO₂ többlet halmozódik fel a légkörben – azaz mennyivel haladja meg a koncentráció az iparosodás előtti 280 ppm-nyi értéket. A hawaii Mauna Loa obszervatóriumában megfigyelt CO₂-szint, amit általában reprezentatív globális átlagos koncentrációként használnak, online elérhető a <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html> címen. A koncentráció a megfigyelés kezdetén, 1959-ben körülbelül 316 ppm volt, és most körülbelül 430 ppm, ami 36 százalékos növekedést jelent. A legutóbbi eljegesedési maximum végére a CO₂-szint körülbelül 180 ppm-re csökkent. Amint azt a 2. fejezetben tárgyaltuk, a C3 növények körülbelül 140 ppm alatti CO₂-szintnél, a C4 növények pedig 100 ppm alatti szinten kezdenek el pusztulni, így a CO₂-szint tovább csökkenése esetén a növényi élet veszélybe került volna.



3.1.3. ábra: A CO₂-koncentráció éves átlagértékének alakulása (1995-2025) ppm-ben, a Mauna Loa-megfigyelés szerint (kék). C3 küszöb: az a szint, ami alatt a C3 növények kezdenek elpusztulni (140 ppm, ld. 2. fejezet). C4 küszöb: Az a szint, ami alatt a C4 növények kezdenek elpusztulni (100 ppm, ld. 2. fejezet). Glaciális CO₂-minimumszint: a jelenlegi jégkorszak legkisebb CO₂-koncentrációja (lila nyíl). CO₂-adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

3.2 Jövőbeni kibocsátási forgatókönyvek és a szén ciklus

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

A jövőbeni ÜHG-kibocsátás veszélyeinek felméréséhez feltételezésekre van szükség arról, hogy mekkora lesz a kibocsátás. A jövőbeni kibocsátás, és így az emberi hatás az éghajlatra egyaránt függ a jövőbeni demográfiai változásoktól, a gazdasági tevékenységtől, a szabályozástól, valamint az energia- és mezőgazdasági technológiáktól. Az ezek mindegyikére vonatkozó egyes feltételezésekből következtetnek az üvegházgáz-kibocsátásra és légköri koncentrációjukra, az aeroszolkoncentráció és a földhasználat változások előrejelzéseire, amiket végső soron kombinálni lehet az antropogén sugárzási kényszerre vonatkozó feltételezésekkel.

A számos tényező mindegyikével kapcsolatos nagy bizonytalanság lehetetlenné teszi a jövőbeni kibocsátás pontos előrejelzését. Ehelyett az IPCC különféle forgatókönyv-készleteket használ. Ezeknek az a célja, hogy felöleljék a népesség, a gazdaság és a technológiák kézenfekvő lehetőségeinek széles skáláját. A forgatókönyvek legújabb verzióit egy szám jelöli, amely az adott forgatókönyv szerint 2100-ban várható antropogén sugárzási kényszert jelzi. Így a „6”-ossal jelölt forgatókönyv 6 W/m² ember által okozott sugárzási kényszernek (felmelegedésnek) felel meg a század végén. (Emlékezzünk vissza, hogy a jelenlegi antropogén sugárzási kényszer körülbelül 2,7 W/m².)

Bár az IPCC nem állítja, hogy kibocsátási forgatókönyvei előrejelzések, gyakran annak kezelik őket. A múltbeli forgatókönyv-csoportok és a megfigyelések összehasonlítása azt mutatja, hogy az IPCC kibocsátási előrejelzései hajlamosak voltak túlbecsülni a tényleges későbbi kibocsátásokat. Az IPCC harmadik és negyedik értékelő jelentéséhez a kibocsátási forgatókönyvekről szóló különjelentésből származó kibocsátási előrejelzések halmazát használták; ezeket SRES-forgatókönyveknek nevezték. McKittrick et al. (2012) kimutatták, hogy az egy főre jutó értékekre

átszámítva a SRES-forгатókönyv kibocsátás-eloszlása a megfigyelt trendekhez képest felfelé torzít. A SRES-forгатókönyvek torzítását megerősítette Hausfather et al. (2019) későbbi elemzése is. Ők azt mutatták ki, hogy a megfigyelt légköri CO₂-koncentráció a SRES-tartomány, valamint a későbbi IPCC-forгатókönyvek tartományainak alsó határát követték (3.2.1. ábra).

Az AR5-höz az IPCC egy új forгатókönyv-készletet dolgozott ki, amelyet reprezentatív koncentrációs útvonalaknak (RCP) neveznek. Ezeket egy olyan számmal azonosították be, amely a kényszererő növekedését jelenti, és így nevezték el őket RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5 néven. Az RCP2.6 (amely 2100-ban 2,6 W/m² antropogén sugárzási kényszert jelent) egy olyan üvegházhatású gázkoncentrációs útvonalat ír le, ami jóval 2°C alatti felmelegedéshez vezet. A skála másik végén az RCP8.5 egy szélsőséges eredmény, ami 1900 és 2100 között közel 5°C-os felmelegedést jelent.

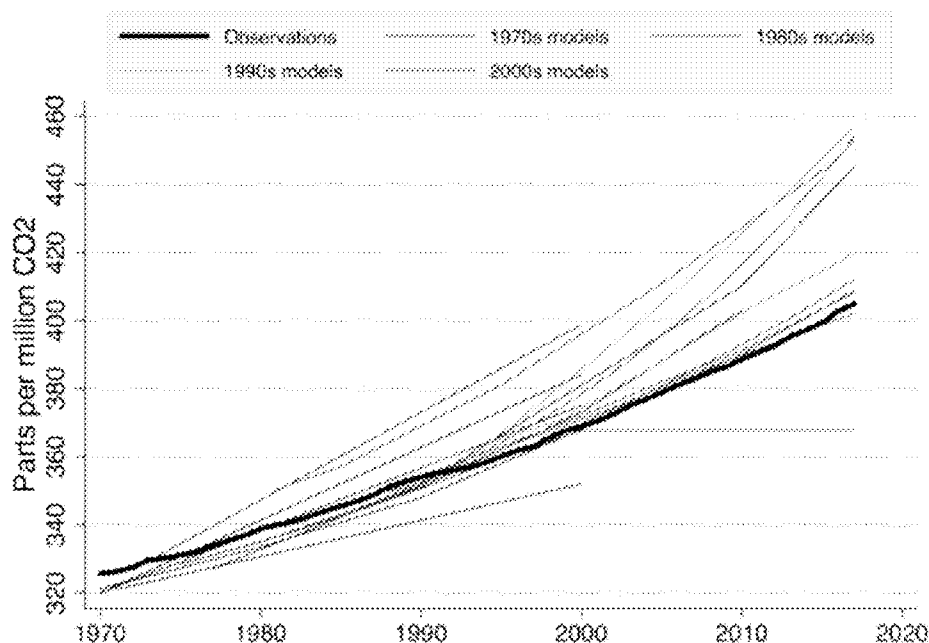
Mind a tudományos irodalomban, mind a népszerű médiában az RCP8.5-öt kezdték a klímapolitika nélküli, vagyis a „szokásos üzletmeneti” forгатókönyvként emleget. Ezért használták fel egy olyan referenciaeredmény generálására, amely az állítás szerint egy egyre szigorúbb kibocsátáscsökkentési politika nélküli 21. századi világot jelenít meg. Az RCP8.5 forгатókönyvet azonban egy alacsony valószínűségű, magas kibocsátású forгатókönyvnek szánták, és a szokásos üzletmenet alapjául szolgáló forгатókönyvként való használatát súlyosan félrevezetőnek minősítették.¹ Hausfather és Peters (2020a) a Nature folyóiratban megjelent kommentárjukban rámutattak, hogy az RCP8.5 forгатókönyvet egy szélsőségesen legrosszabb esetként dolgozták ki, és a „szokásos üzletmenet” alapjául való helytelen használata számos félrevezető tanulmányhoz és médiabeszámolóhoz vezetett.

Az RCP8.5 forгатókönyv valószínűtlenségét Burgess et al. (2021) részletes vizsgálatnak vetette alá. Az RCP8.5 valószínűtlenségét nem szabad *nagyon valószínűtlennek* (pl. 95. percentilisnek) vagy „legrosszabb esetnek” tekinteni, hanem inkább valóban valószínűtlennek, mivel a 8,5 W/m²-es kényszerhez szükséges bemenetek igen valószínűtlenek. Megjegyezték, hogy az RCP8.5 máris eltért az energiafelhasználás megfigyelt trendjétől, és a közeli jövőre vonatkozó trend élesen eltér a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) trendjétől, ami az elkövetkező évtizedekre piaci alapú energiafelhasználási előrejelzéseket ad. Pielke Jr. et al. (2022) kimutatta továbbá, hogy az IEA történelmi és előrejelzési trendjei az alján helyezkednek el mind az RCP-előrejelzések, mind a frissebb Megosztott Társadalmi-gazdasági Útvonal (SSP) forгатókönyv alsó burkológörbéinek.

Schwalm et al. (2020) azzal védtek az RCP8.5 használatát, hogy a 2005–2020 közötti kumulatív CO₂-kibocsátás inkább követi ezt, mint az alacsonyabb RCP-forгатókönyveket. Azt is állítják, hogy az elkövetkező évtizedekben az IEA-forгатókönyvek módosított változata szorosan követi az RCP8.5-öt. Hausfather és Peters (2020b) válaszukban azt mondták, hogy az RCP8.5 képessége az említett 15 évben az üzemanyag-felhasználásból és a földhasználat-változásból eredő CO₂-reprezentációban előforduló hibák eltüntetésének következménye, és az IEA-val való látszólagos egyezés az elkövetkező évtizedekben Schwalm et al. érdeme, akiknek a földhasználati kibocsátásra túl magas járulékos tényezőt vezettek be. Az IEA saját előrejelzett CO₂-kibocsátása jóval alatta marad az RCP8.5-nek.

Az RCP8.5 széles körű, szakpolitikai kiindulási alapként való használata aggodalomra okot adó tendenciát teremtett az éghajlatváltozás hatásaival foglalkozó szakirodalomban. A probléma mértékét Pielke Jr. és Ritchie (2020) szakirodalmi elemzése is megerősítette. Megállapították, hogy 2010 és 2020 között mintegy 16 800 tudományos cikk alkalmazta az RCP8.5 forгатókönyvet, amelyek közül körülbelül 4500 az „üzletmenet a szokásos módon” koncepciójához kötötte az RCP8.5-öt. Elemzésük kimutatta, hogy az RCP8.5-öt nemcsak az egyes kutatók használták rosszul, hanem olyan befolyásos tudományos ügynökségek is visszaéltek az RCP8.5-tel, mint az IPCC és az Egyesült Államok Nemzeti Éghajlatváltozási Értékelése (USNCA). Mindez a fősodratú médiában azon nyomban félrevezető tudósításokhoz vezetett.

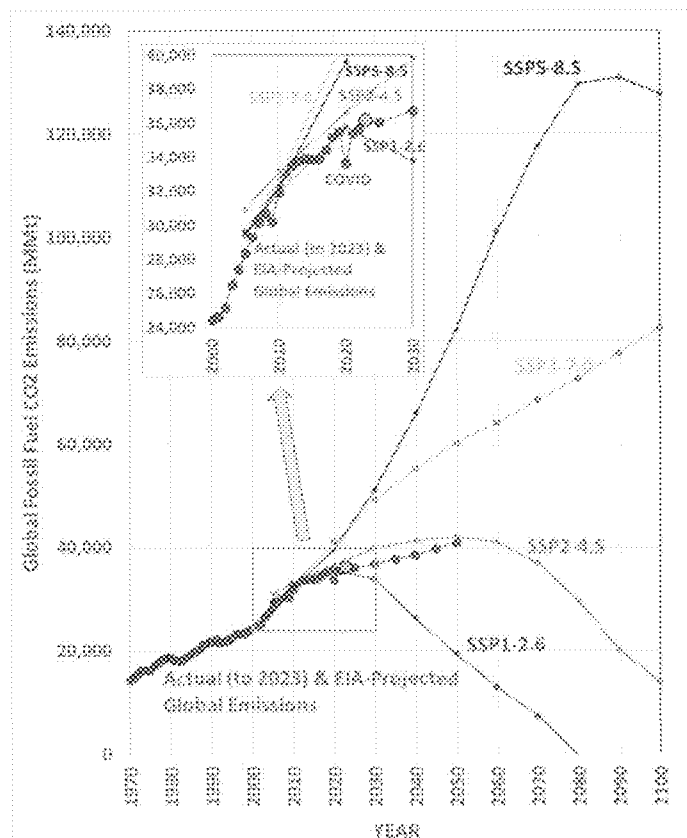
¹ Ez a szélsőséges forгатókönyv hasznos a modellezők számára, ugyanis ha a kényszerítő tényező nagy, az nagy választ (felmelegedést) generál, ami megkönnyíti a modell érzékenységének felmérését. De ez egészen más, mint azt állítani, hogy ez egy valószínű jövőbeli kimenetel.



3.2.1 ábra: AZ 1970-es évek óta az kibocsátásra és a koncentrációra vonatkozó, egymást követő előrejelzések (színes vonalak) következetesen túlbecsülték a méréseket (fekete vonal). Forrás: Hausfather et al. (2019) S4. ábra

Pielke és Ritchie (2020) arról számoltak be, hogy az RCP8.5-öt használó új tanulmányok száma napi 20 volt, amelyek közül körülbelül napi kettő kifejezetten összekötötte az RCP8.5-öt és a „szokásos üzletmenetet”. Arra a következtetésre jutottak, hogy az klímakutató közösség egy teljes évtizedet töltött azzal, hogy „tudományos erőforrásokat sci-fi”, és hogy „a tudományos szakirodalom apokaliptikus irányban kiegyensúlyozatlanná vált”.

Az IPCC új forgatókönyveket dolgozott ki az AR6-hoz, a „Megosztott társadalmi-gazdasági út” (SSP) forgatókönyveket, amelyekben az RCP és SRES forgatókönyvekben mutatott torzítás tovább folytatódott. A 3.2.2. ábra a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által összeállított teljes globális megfigyelt CO₂-kibocsátást mutatja, egyesítve az IEA kibocsátási előrejelzésével, figyelembe véve az energiateljesítményi előrejelzéseket és a jelenlegi politikákat. A többi vonal az IPCC SSP-forgatókönyveinek tartományát (SSP1-SSP5) mutatja. 2023-tól a globális CO₂-kibocsátás jóval az SSP7.0 alatt maradt, sőt az SSP2-4.5-nek is alá került.



3.2.2. ábra: Megfigyelt és előrejelített CO₂-kibocsátás. Forrás: IPCC (SSP scenáriók) és Energy Information Administration (EIA). Zöld: megfigyelt történelmi kibocsátás és az EIA előrejelzése. Egyéb vonalak: SSP1-5. Adatforrás: Friedlingstein et al. (2024).

3.2.2 A kibocsátásokhoz és a koncentrációkhoz kapcsolódó szén ciklus

A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből (valamint kisebb mértékben az erdőirtásból és a cementgyártásból) származó szén-dioxid-kibocsátás a légkör CO₂-koncentrációjának folyamatos emelkedéséhez vezetett, amint azt a 3.1.3. ábra mutatja. A kibocsátások és a koncentráció közötti kapcsolatot a szárazföldi és óceáni folyamatok globális szén ciklusa határozza meg, amelyek során a légkörrel szén-csere történik. E folyamatok megértéséhez Crisp et al. (2021) segített hozzá.

A Föld légkörében körülbelül 850 Gt szén (GtC) található², szinte teljes egészében CO₂ formájában. Ebből a szénből a biológiai folyamatok (növényi növekedés és -lebomlás) és a fizikai folyamatok (óceáni abszorpció és gázkibocsátás) évente körülbelül 200 GtC-t cserélnek ki a Föld felszínével (nagyjából 80 GtC-t a kontinensekkel és 120 GtC-t az óceánokkal). Mielőtt az emberi tevékenység jelentőssé vált, a légkörből való kivonódás nagyjából egyensúlyban volt a hozzáadódással.

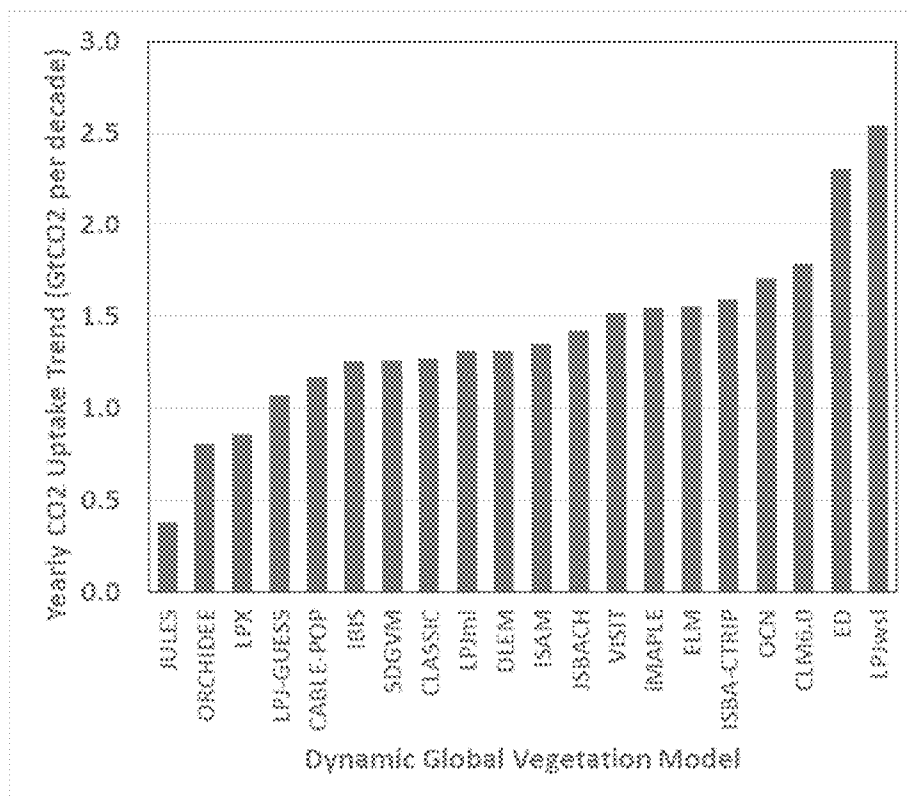
A fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj és gáz) elégetése azonban kivonja a szenet a talajból, és hozzáadja azt a légkörrel történő évi cseréhez. Ez a többlet (a cementgyártás sokkal kisebb hozzájárulásával együtt) 2023-ban 10,3 GtC-t tett ki, ami a légkörrel végbement éves csere mindössze 5 százaléka.

² Mivel a CO₂ a szén ciklus során kémiai átalakul, kényelmesebb a CO₂ molekulái helyett a szénatomokat nyomon követni. Egy gigatonna szén (GtC) körülbelül 3,7 Gt CO₂-nek felel meg.

A szén ciklus az emberiség kis éves szén-dioxid-befecskendezésének körülbelül 50 százalékát teszi ki azáltal, hogy azt a növények növekedése és az óceáni felvétel természetes módon megköti, míg a fennmaradó rész felhalmozódik a légkörben (Ciais et al., 2013). Emiatt a légköri CO₂-koncentráció éves növekedése átlagosan csak körülbelül a fele annak, amit az emberi kibocsátásokból naivan várnánk. A légkör jövőbeli CO₂-koncentrációjának, és így az éghajlatra gyakorolt jövőbeli emberi hatásoknak az előrejelzéséhez fontos tudni, hogy a jövőben miként változhat a szén ciklus. Az 50 százalékos arány történelmileg közel állandósága azt jelenti, hogy minél több CO₂-t termelt az emberiség, annál gyorsabban távolította el a természet a légkörből. Ez az 50 százalékos arány az El Niño, a La Niña és a változó időjárási mintázatok okozta természetes szén ciklus-egyensúlyhiányok miatt évről-évre némileg változik. A Pinatubo-hegy 1991-es kitörése után a légköri CO₂ mennyisége is jelentősen csökkent, ami egy érdekes eredmény, és ezidáig még nem sikerült megmagyarázni (Angert et al., 2004). A légkörből a felesleges CO₂-t eltávolító fő folyamatok közé tartozik a szárazföldi növényzet fokozott növekedése (különösen a magas földrajzi szélességeken), a talaj szénmegkötésének némi növekedése, valamint az óceán általi CO₂-felvétel a légköri CO₂ parciális nyomásának növekedése miatt az óceánban oldott CO₂ nyomásához képest. A Globális Szén Projekt (Friedlingstein et al., 2024) által nyomon követett mind a húsz szárazföldi szén ciklus-modell azt mutatja, hogy a szárazföldi folyamatok 1959 óta egyre növekvő ütemben vonják el a felesleges CO₂-t. Ez összhangban van az 1982 óta műholdakkal megfigyelt „globális zöldülés” jelenségével (2.1. fejezet). Míg a szárazföldi növényzet pozitívan reagál a légköri CO₂-többletre, az óceáni biológiai folyamatok általi többlet CO₂-felvétele túl bizonytalan ahhoz, hogy megbízhatóan mérhető legyen. Az itt leírt ismeretek és számos további szén ciklus-folyamat leírása Crisp et al. (2021) összefoglalójában található.

CO₂-felvétel szárazföldi folyamatok által

A légkörből származó többlet CO₂ szárazföldi felszíni folyamatok általi felvételét (ahogyan azt a globális zöldülésből is következtetjük) 20 különféle dinamikus globális vegetációs modellel modellezték, amelyek eredményeit a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. Amint a 3.2.3. ábrán is látható, ezek a modellek egyetértenek abban, hogy a növényzet és a talaj megköti a szén a légkörből. Azt is látjuk azonban, hogy az 1959 és 2023 közötti (65 év) hosszú távú trendekben a modellek nagymértékben (közel hétszeres szorzótényezővel) különböznek egymástól. Mindez azt mutatja, hogy továbbra is jelentős bizonytalanság van abban, hogy a szárazföldi folyamatok milyen gyorsan távolítják el a CO₂-t a légkörből, ami viszont bizonytalanságot szül a jövőbeli légköri CO₂-koncentrációt illetően, ami pedig bizonytalanná teszi a jövőbeli éghajlatváltozás klímamodel-szimulációit is.

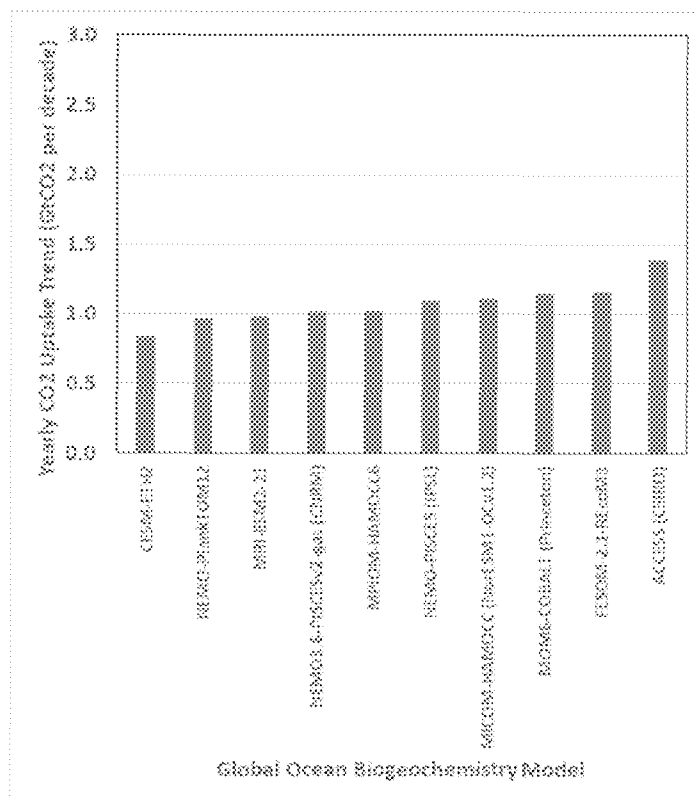


3.2.3 ábra: Szárazföldi folyamatok általi éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) 1959-2023 között, 20 különféle dinamikus globális vegetációmóddal, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

CO₂-felvétel óceáni folyamatok által

Az óceáni folyamatok légkörből történő többlet CO₂-felvételét 10 különböző óceáni biogeokémiai modell segítségével modellezték. Az eredményeket a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. A szárazföldi modellek eredményeihez hasonlóan az összes óceáni modell egyetért abban, hogy a globális óceánok 1959 és 2023 között egyre nagyobb ütemben vontak ki szén a légkörből (3.2.4. ábra). A szárazföldi modellekkel ellentétben azonban az óceáni modellek sokkal jobb egyezést mutatnak egymással, a leggyorsabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell mindössze 65 százalékkal gyorsabb, mint a leglassabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell. A modellek közötti relatív egyezés ellenére Friedlingstein et al. (2022) megjegyzi, hogy az elmúlt évtizedben jelentős eltérés mutatkozik a különböző módszerek között az óceáni elnyelődés erősségét illetően, különösen a Déli-óceánon (az Antarktiszi-óceánon).

Megjegyzendő, hogy a 3.2.3. ábrán látható összes szárazföldi modellben a CO₂-felvétel átlagos trendje 25 százalékkal nagyobb, mint az óceáni felvétel átlagos trendje. Ez arra utal, hogy a szárazföldi folyamatok gyorsabban képesek a levegőből eltávolítani a CO₂-t, mint az óceáni folyamatok.



3.2.4 ábra: Az éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) az óceáni folyamatok által 1959-2023 között, 10 különféle dinamikus globális biogeokémiai modellel, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

3.3 Az urbanizáció hatása a hőmérsékleti trendekre

A szárazföldi történelmi hőmérsékleti adatokat főként ott gyűjtötték, ahol emberek élnek. Ez felveti azt a problémát, hogy hogyan lehet kiszűrni a városi hőszigetek (UHI) és a kontinensfelszín egyéb változásai miatt jelentkező nem éghajlatváltozás-eredetű felmelegedési jeleket. Ha ezeket nem távolítják el, az adatok túlzott mértékben tulajdoníthatják üvegházhatású gázoknak a megfigyelt felmelegedést. Az IPCC elismeri, hogy a nyers hőmérsékleti adatok UHI-hatásokkal szennyezettek, de azt állítja, hogy rendelkeznek olyan adattisztítási eljárásokkal, amelyek ezeket eltávolítják. Nyitott kérdés, hogy ezek az eljárások megfelelőek-e.

Az AR6 elbagatellizálta ezt a problémát azzal, hogy (WGI 235. o.) azzal, hogy nem merült fel újabb bizonyíték, amely megváltoztatná az AR5 megállapítását, miszerint az urbanizáció a globális szárazföldi felszín felmelegedési trendjében legfeljebb 10 százalékos felfelé irányuló torzítást okoz. Az AR5 (WGI 189. o.) szintén a 10 százalékos felső határt idézte, forrásmegjelölés nélkül. Az AR4 (WGI 244. o.) az állítás alapjául Jones et al. (1990) és Peterson et al. (1999) munkáira hivatkozott. Peterson et al. nem találtak különbséget a vidéki és a városi minták közötti trendekben, bár a „vidék”-re vonatkozó definíciójuk az volt, hogy a lakosság száma legfeljebb 10 000 fő, míg az urbanizáció relatív hatása jóval ez alatt elkezdődik (Spencer et al., 2025). Jones et al. a vidéki/városi felmelegedést három régióban hasonlította össze: Kelet-Ausztráliában, Kelet-Kínában és a Szovjetunió nyugati részén. „Vidék” definíciójuk a volt Szovjetunióban legfeljebb 10 000 lakosság volt, míg Kínában legfeljebb 100 000. Ezekben a területeken 10 százaléknál nagyobb relatív felmelegedési torzítást találtak, de azt feltételezték, hogy az általuk nem vizsgált területek átlagolt urbanizációs hatása a globális szárazföldi torzítást a megfigyelt felmelegedési trend 10 százaléka alá csökkentené.

Az IPCC AR4 előtt számos tanulmány jelent meg nyomtatásban, amelyek azt állították, hogy az UHI-k felmelegedési hatása a megfigyelt felmelegedéshez viszonylag nagy (30–50%-os) hozzájárulást adott, és ez a klímamodell-szimulációkból kimaradt (de Laat és Maurellis 2006, McKittrick és Michaels 2007). Ezek az eredmények a szárazföldi maximális felmelegedés helyszínei és a maximális társadalmi-gazdasági fejlődés helyszínei közötti korreláción alapultak. Az AR4 jelentés (244. o.) azt állította, hogy ezek a korreláció a természetes légköri cirkuláció műterméke, és valójában statisztikailag jelentéktelen, és ezen az alapon eltekintett az eredmények figyelembevételétől. Ez az állítás vitatható, mivel nem mutattak fel semmiféle bizonyítékot. McKittrick (2010), valamint McKittrick és Nierenberg (2010) kimutatták, hogy a korrelációra vonatkozó különféle alternatív magyarázatok nem befolyásolják a korreláció jelentőségét. Az AR5 jelentés (189. o.) elismerte, hogy az AR4 „nem szolgáltatott explicit bizonyítékot” az értékeléshez, és ezen dokumentumok alapján elismerte, hogy „jelentős bizonyíték van az adatok ilyesféle szennyeződésére”, azaz a szárazföldi adatokban felmelegedési torzításra utal. Azonban, ahogy már említettük, az AR5 jelentés többi részében fenntartották az AR4 állítását, miszerint ez a megfigyelt felmelegedés kevesebb mint 10 százaléka. Továbbá nem adtak figyelmeztetést a szárazföldi adatok éghajlati mérésekre való felhasználásával kapcsolatban, annak ellenére, hogy elismerték az UHI szennyeződés bizonyítékait. Nemrégiben Soon et al. (2023) azt becsülte, hogy az északi félteke szárazföldi hőmérsékletváltozási adataiban az 1850–2018 közötti urbanizációs torzítás elegendő volt ahhoz, hogy a kevert (városi+ vidéki) adatok trendje évszázadonként 0,55°C-ról 0,89°C-ra növekedjen.

Néhány, az UHI szennyezés ellen bizonyítékot nyújtó tanulmány összehasonlította a vidéki és városi helyszínek felmelegedési ütemét (Jones et al. 1990, Peterson et al. 1999, Wickham et al. 2013). Nem ismert, hogy az efféle módszerek képesek lennének-e kimutatni az UHI torzítást akkor is, ha az jelen van. Az UHI felmelegedés hatása a népesség függvényében logaritmikusan viselkedik, más szóval kis népsűrűség esetében a legerősebb, majd a helyi urbanizáció kiterjedésével egyenletesebb lesz (Oke 1973, Spencer et al. 2025). Ezért az, hogy nem találtak különbséget a városi és vidéki állomások felmelegedési ütemében, nem bizonyítja az UHI szennyezés hiányát. McKittrick (2013) empirikus bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy a vidéki/városi trend egy olyan adathalmazban, amelyről más alapon kimutatták, hogy UHI torzítással szennyezett, nem különbözik szignifikánsan egymástól.

Parker (2006) városi helyszínekből vett minták vizsgálatával a trendekben nem talált eltérést az éjszakai szélsőbesség szerint felosztott részhalmazok között, és ennek alapján arra a következtetésre jutott, hogy az urbanizáció nem lehet szignifikáns tényező. Itt ismét az a kérdés, hogy egy ilyen módszer kimutatná-e az UHI torzítását, még ha jelen is lenne. McKittrick (2013) bemutatott egy olyan példát, amelyben az UHI-val szennyezett adatok nem mutattak szignifikáns trendkülönbségeket a szélsőbesség szerinti csoportosítás alapján.

Az UHI torzítás mérésének kihívása az, hogy a helyi hőmérsékletváltozást a népesség vagy az urbanizáció megfelelő változásához kellene kötni, és nem egy statikus osztályozási változóhoz, például ahhoz, hogy vidéki vagy városi. Spencer et al. (2025) egy ilyen elemzés elvégzéséhez újonnan elérhető történelmi népességi archívumokat használt fel, és az amerikai nyári hőmérsékleti adatokban jelentős UHI torzításra talált bizonyítékot.

Összefoglalva: a szárazföldi hőmérsékleti megfigyelésben ugyan egyértelműen kimutathatóak felmelegedésből adódó változások, arra is utalnak bizonyítékok, hogy az urbanizációs mintázatok e tendenciát felfelé torzítják, és hogy ezeket a torzításokat az éghajlati adatkészletek előállításához használt adatfeldolgozó algoritmusok nem szüntették meg teljesen.

Hivatkozások

Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO2 seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. *Geophysical Research Letters* 31.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019760>

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2013) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2007) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Burgess, Matthew et al (2021) Environmental Research Letters 16 014016
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcdd2/meta>
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate Research in Astronomy and Astrophysics 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & McKinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. Reviews of Geophysics. 60. 10.1029/2021RG000736.
- De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, International Journal of Climatology 26:897—913.
- Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, Earth System Science Data 14(4), <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>
- Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” Geophysical Research Letters 47(1) <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020a) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” Nature 29 January 2020 <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020b) RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. Proceedings of the National. Academy of Sciences 117, 27791–27792 (2020)
- Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. Nature Climate Change. 13, 127–129 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>
- Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, Nature, 347, 169 – 172
- Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” Science Advances 7(22) May 2021
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>
- McKittrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, Journal of Geophysical Research, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.

- McKittrick, Ross R. (2010) Atmospheric Oscillations Do Not Explain the Temperature-Industrialization Correlation. *Statistics Politics and Policy* Vol 1. No. 1., July 2010
- McKittrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. *Climatic Change* doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5>
- McKittrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) Socioeconomic Patterns in Climate Data. *Journal of Economic and Social Measurement*, 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336
- McKittrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) “Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per-Capita Approach.” *Journal of Forecasting*, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7, 769-779
- Parker, D.E. (2006) “A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban.” *Journal of Climate* 19:2882—2895.
- Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, Jay Lawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* February 1999 <https://doi.org/10.1029/1998GL900322>
- Pielke Jr., Roger and Ritchie, Justin (2020) “Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment” *Social Sciences Research Network* April 2020, available at: <https://ssrn.com/abstract=3581777>
- Pielke Jr, R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. *Environmental Research Letters* 17 024027 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4ebf/pdf>
- Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from TSI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. *Remote Sensing* 11(21) 2569 <https://doi.org/10.3390/rs11212569>
- Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *Journal of Geophysical Research*, 129.
- Schwalm, C.R., S. Glendon, P. B. Duffy (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 117, 19656–19657 (2020). Soon, W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; et al. (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. *Climate* 2023, 11, 179. <https://doi.org/10.3390/cli11090179>
- Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* April 2025 <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1>
- Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, et al. (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. *Geoinformatics and Geostatistics: An Overview* 1:2.
- Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. *Surveys in Geophysics* 35 pp. 897—912 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y>

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

Fejezet-összefoglaló

Egyre erősödik az a felismerés, miszerint a klímamodellek alkalmatlanok az emelkedő CO₂-koncentráció hatására fellépő ún. egyensúlyi klímaérzékenység (ECS) meghatározására. Az IPCC adatalapú megközelítések felé fordult, beleértve a történelmi adatokat és a paleoéghajlati rekonstrukciókat, de ezek megbízhatóságát adatokhiányok korlátozzák.

Az adatalapú klímaérzékenység (ECS) értékek általában alacsonyabbak, mint a klímamodellekből származók. Az IPCC AR6 az ECS valószínű tartományára vonatkozóan felső határként 4,0°C-ot ad meg, ami alacsonyabb, mint az AR5 4,5°C-os értéke. Úgy tűnik, hogy a felső határ csökkentését a paleoéghajlati adatok kellően alátámasztják. Az AR6 alsó határa az ECS valószínű tartományára vonatkozóan 2,5°C, ami lényegesen magasabb, mint az AR5 1,5°C-os értéke. Az alsó határ emelése kevésbé indokolt; az AR6 óta előkerült bizonyítékok szerint a *valószínű* tartomány alsó határa 1,8°C körüli értékre tehető.

4.1 Bevezetés

Az éghajlat emelkedő CO₂-koncentrációra adott válaszána nagysága az antropogén klímaváltozásról szóló tudományos vitában, így a „klímapolitikai fellépésről” szóló nyilvános vitában is központi szerepet játszik. Ennek a válasznak a legegyszerűbb mértéke a globális átlagos felszínhőmérséklet emelkedése, amelyet az Egyensúlyi Klímaérzékenység (ECS) számszerűsít. Az ECS-t a CO₂ iparosodás előtti 280 ppm-es koncentrációjához képesti megduplázódására várható felmelegedés mértékeként definiálják, miután minden klímakomponensnek volt ideje az alkalmazkodásra. Egyes összetevők, mint például az alsó légkör (troposzféra) hőmérséklete, gyorsan alkalmazkodnak, míg más összetevők alkalmazkodása, például a mélyóceáné és a krioszféraé, akár évszázadokig is eltarthat. A rövidebb időléptékeket jobban leírja egy kapcsolódó mérőszám, az Átmeneti Klímaválasz (TCR); definíció szerint ez annak a felmelegedésnek a mértéke, amikor a CO₂-koncentráció úgy megduplázódik meg, hogy 70 éven keresztül évi egy százalékos emelkedik.

Az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiája számára 1979-ben készült Charney-jelentés (National Research Council 1979) azt javasolta, hogy a legvalószínűbb ECS $3,0 \pm 1,5^\circ\text{C}$ legyen. Az IPCC ismételten megerősítette ezt a tartományt, csak kisebb eltérésekkel, egészen a legutóbbi, 6. számú jelentéséig. Az 5. számú jelentés 1,5–4,5 °C-ot jelölt meg valószínű tartományként (66 százalékos valószínűséggel), továbbá kijelentette: rendkívül valószínűtlen, hogy az ECS (95 százalékos valószínűséggel) 1,0 °C alatt legyen, és nagyon valószínűtlen (90 százalékos valószínűséggel), hogy meghaladja a 6,5 °C-ot.

Az ECS bizonytalansága makacsul nagy maradt, annak ellenére, hogy számos egyedi tanulmány a szűkítést állította (Hausfather 2023). Legutóbb az 6. számú jelentés a *valószínű tartományt* 2,5–4,0 °C-ra szűkítette, és a *nagyon valószínű tartományt* 2,0–5,0 °C-nak tekintette. Ez az alsó tartománybeli szűkítés vitatott, amint azt alább tárgyaljuk.

Az ECS bizonytalanságai a politikai döntéshozatal szempontjából nagy jelentőséggel bírnak. Amint azt a 11. fejezetben tárgyaljuk, a gazdasági modellek a CO₂-kibocsátás költségeinek előrejelzésére az ECS értékeit használják. A hagyományos érték (3,0 °C) a CO₂-kibocsátás tekintetében jellemzően szerény globális társadalmi költségekkel járt, ami elegendő volt bizonyos politikai intézkedések igazolására, de ezeket többnyire a század későbbi szakaszára halasztották. Ha az ECS nagyon magas (4,5 °C felett), akkor sürgetőbbé válik az azonnali agresszív kibocsátás-szabályozás, míg 2,0 °C alatti ECS esetén gazdaságilag semmilyen CO₂-kibocsátás-szabályozás nem indokolt (Dayaratna et al. 2017, 2020). Pontos becslést lehetetlen készíteni, ezért a politikai döntéshozatalnak a bizonytalanságot figyelembe kell vennie.

Önmagában a légköri CO₂ megduplázódásának egyensúlyi felmelegedési hatása valamivel több, mint 1 °C (Soden és Held 2006). Az ECS nagyobb értékei már pozitív visszacsatolásokról erednek, amelyek a CO₂ felmelegedését felerősítik. A vízgőz-visszacsatolás pozitív: melegebb légkörben több vízgőz lehet, ami önmagában is erős üvegházhatású gáz. A melegebb hőmérséklet kevesebb hó- és tengeri jégtakarót is eredményez, ami lehetővé teszi a Föld számára, hogy többet nyeljen el a napsugárzásból. Ezen visszacsatolások néhány egyszerű becslése az ECS-t körülbelül 2°C-ra növeli (Sherwood et al., 2020). Az ECS magasabb értékei pozitív felhő-visszacsatolásokkal kapcsolatosak.

Klímakutatók az egyensúlyi klímaérzékenység meghatározásához többféle bizonyítékot használnak:

- Klímamodell-szimulációk
- Történelmi megfigyelések
- Paleoklíma-rekonstrukciók
- A visszacsatolások folyamatalapú megértése

4.2 A klímaérzékenység modellalapú becslése

Az IPCC AR4-ben és AR5-ben megadott ECS-tartományokat elsősorban nagyléptékű klímamodellek, más néven általános cirkulációs modellek (GCM-ek) viselkedésének vizsgálatával kapták meg. Az IPCC azonban az AR6-ban irányt váltott, amikor egy közvetlenebb, adat alapú módszertan felé fordult. Itt a GCM-ből kiinduló klímaérzékenység-meghatározás használatának néhány buktatóját tárgyaljuk.

Az ECS klímamodell-szimulációkból a CO₂ koncentrációját megduplázásával határozható meg úgy, hogy a felmelegedés egyensúlyba kerüléséig több évszázadnyi várakozást is figyelembe vesznek. Az ilyen hosszú szimulációk szükségességének elkerülése érdekében a „tényleges klímaérzékenységet” általában a CO₂ hirtelen megkétszereződését követő 150 éves szimulációból adják meg.

Az ECS elvileg a globális felmelegedési modellek (GCM) a rendszer egészéből levezethető (ún. emergens) tulajdonsága – vagyis nem közvetlenül paraméterezett vagy hangolt, hanem a szimuláció eredményeiben jelenik meg. Az egyébként hihető GCM-eket és paraméterválasztásokat azonban a várható felmelegedési ütemmel való észlelt konfliktus, illetve az elfogadott tartományon kívül eső modell klímaérzékenységével szembeni idegenkedés miatt elvetették (Mauritsen et al. 2012). Ez volt a bevett gyakorlat az AR4-ben használt modellek esetében; a modellezők azonban idővel eltávolodtak ettől. Mauritsen és Roeckner (2020) azonban még egy CMIP6 modellben is a következőket állítják a Max Planck Intézet (MPI) klímamodelljükkel kapcsolatban (a kiemelés tőlünk való):

„Dokumentáltuk, miként hangoltuk az MPI-ESM1.2 globális klímamodellt, hogy az megfeleljen a felmelegedés műszeres adatainak; ez a törekvés egyértelműen sikeres volt. Az események történelmi sorrendje miatt a választás az volt, hogy ezt gyakorlatilag úgy tegyük meg, hogy nem aeroszolkényszer hangolásával, hanem **felhő-visszacsatolások** segítségével körülbelül 3 K-es **ECS-t célozzunk meg.**”

Azaz az MPI modellezők kiválasztották a 3°C-os ECS-értéket, majd a felhőparaméterezéseket a kívánt eredményhez hangolták.

Amint megjegyeztük, a CO₂-megduplázásból eredő közvetlen felmelegedés csak körülbelül 1°C (Soden és Held 2006); a további felmelegedés olyan éghajlati visszacsatolásokról ered, amelyeket a GCM nem explicit módon, hanem fizikai folyamatok paraméterezésén alapulva old meg. Az ECS

visszacatolási paraméter becslését igényli, amelynek bizonytalanságai a kapott ECS-ben nagymértékben felerősödnek (Roe és Baker, 2007).

Az adatalapú módszerek pontossága a bemeneti adatok minőségétől függ. Feltételezésekre van szükség az óceánok hőtárolásával kapcsolatban, és jó adatok csak az elmúlt évtizedekre állnak rendelkezésre. A legnagyobb bizonytalanság forrása az aeroszolrészecskék mennyisége és összetétele, valamint azok kölcsönhatása a felhők sugárzási tulajdonságaival (az úgynevezett aeroszol közvetett hatása; lásd a 3.1.1., 3.1.2. ábrákat). Az éghajlati modellek az üvegházhatású gázokra válaszul felmelegedést, az aeroszolokra pedig lehűlést mutatnak (Schwartz et al., 2007). A megfigyelt 20. századi felmelegedés vagy az alacsony ECS-sel és a kismértékű aeroszol lehűléssel, vagy a magas ECS-sel és a magas aeroszol lehűléssel van kimutathatóan összhangban. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok használata mind üvegházhatású gázokat, mind aeroszolókat juttat a légkörbe, a CO₂ felmelegítő hatásának elkülönítéséhez mindkét hatást meg kell becsülni.

A paleoklíma- proxikat a Föld hőmérsékletében bekövetkezett paleoéghajlati változások és a kényszerítő tényezők változásaira vonatkozó becslések összehasonlításával a múltbeli éghajlati érzékenység megismerésére is alkalmazzák. A két leginformatívabb időszak az utolsó jégkorszaki maximum (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt), ami alatt körülbelül 3–7 °C-kal hidegebb volt, mint ma, és egy középső pliocén időszak (körülbelül hárommillió évvel ezelőtt), aminek folyamán 1–3 °C-kal melegebb volt, mint ma. A legjobb bizonyítékot arra, hogy az éghajlati érzékenység magas értékei valószínűtlenek, az utolsó jégkorszaki maximum idején tapasztalt lehűlés korlátok adják. A paleoklíma-becslés azonban a becsült hőmérsékletekben és kényszerítő tényezőkben egyaránt nagyon nagy bizonytalanságokkal jár. Továbbá a múltbeli éghajlati állapotokon alapuló éghajlati érzékenység becslése nem feltétlenül alkalmazható az éghajlati rendszer jelenlegi állapotára.

Az éghajlati szakirodalomban vissza-visszatérő téma, hogy a történelmi adatokon alapuló ECS-becslés kisebb értéket ad, mint az éghajlati modellekből következtetett ECS-becslés (Sherwood és Forest 2024). A 2012 és 2024 közötti lektorált szakirodalomban körülbelül 15, historikus adatokon alapuló becslés jelent meg, amelyek az ECS legjobb becslését 1,0 °C és 2,5 °C között adták, bár a kritikusok megkérdőjelezték néhány módszert, valamint az adatok minőségét is. Az AR6 esetében az IPCC elsődlegesen Sherwood et al. (2020) eredményein alapul, amelyek a historikus adatokat és a paleoklimatikus közelítő értékeket folyamatalapú megközelítéssel kombinálták, és legjobb becslésre 3,1 °C-ot kaptak, 2,6-3,9 °C közötti valószínű tartománnyal. Lewis (2022) számos aggályt fogalmazott meg ezzel az eredménnyel kapcsolatban, beleértve a módszertani hibákat, az elavult bemeneti értékeket és a szubjektív Bayes-előfeltevések használatát az elemzésben. Lewis elemzése megállapította, hogy az éghajlati érzékenységre sokkal alacsonyabb becsült értékek és sokkal szűkebb korlátok adódnak, mint amik kijöttek a Sherwood et al. által végzett elemzésből. A medián 2,2°C (1,8–2,7°C a 17–83 százalékos valószínűségi tartományban, és 1,6–3,2°C az 5–95 százalékos, nagyon valószínű tartományban). Az IPCC AR6 mindössze 5 százalékos valószínűséget becsült arra, hogy az ECS 2,3°C alatt lesz, míg ugyanezt Lewis 50 százalék felettire becsülte. A Sherwood et al., valamint Lewis közötti vitáról szóló legfrissebb publikációk tovább védik álláspontjukat: Sherwood és Foster (2024), valamint Lewis (2025).

Az AR6-ban hangsúlyozott érv szerint az adatalapú ECS-becslések az úgynevezett „mintázathatás” miatt alábecsülhetik az üvegházhatású gázokra adott jövőbeli felmelegedési reakciót (Forster et al., 2021). Úgy vélik, hogy a Csendes-óceán trópusi részén erősen befolyásolja a Föld ürbe történő hősugárzásának általános hatékonyságát, de egyes régiók hatékonyabban távolítják el a hőt, mint mások. Ha a trópusi Csendes-óceán nyugatról keletre irányuló hőmérsékleti gradiense egy melegebb éghajlatban gyengül, a felmelegedés ott koncentrálódik, ahol a hő kevésbé hatékonyan távolítható el, növelve az ECS-t.

A legtöbb klímamodell azt szimulálja, hogy az emelkedő koncentrációjú üvegházgázok gyengítik a nyugat-keleti hőmérsékleti gradienst, ami arra késztette az IPCC-t az AR6-ban, hogy arra a következtetésre jusson, hogy az adatalapú ECS-becslések a jövőbeni ECS-értéket alábecsülték. Seager et al. (2019) azonban rámutatott arra, hogy - a modellekkel ellentétben - a nyugat-keleti hőmérsékleti gradiens az idő múlásával erősödött. Azzal is érveltek, hogy a klímamodellekben ennek az ellenkezőjét előrejelző mechanizmus az óceáni dinamika hibás jellemzésén alapult, és nincs ok arra,

hogy a gradiens gyengüljön. Hasonló érvet fogalmazott meg nemrégiben Lee et al. (2024). E tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy „a megfigyelt trend íve az erősödő légköri ÜHG-terhelésre adott választ tükrözi”; más szóval, az ÜHG-felmelegedésnek a hőmérsékleti gradiens jövőbeni erősödéséhez, nem pedig gyengüléséhez kellene vezetnie. A légköri hűtés egyre erősebb hatékonysága azzal jár, hogy a jövőbeni ECS egy melegebb éghajlaton *alacsonyabb* lehet a jelenlegi becsléseknél.

4.4 Tranziens klímaérzékenység

Az átmeneti klímaválasz (TCR) az éghajlati érzékenységre vonatkozóan hasznosabb megfigyelési korlátot biztosít. A TCR az a globális hőmérséklet-emelkedés, amely akkor következik be, amikor a CO₂-szint 70 éven keresztül évi 1 százalékkal növekszik (azaz fokozatosan duplázódik meg). Az ECS-hez képest a megfigyeléssel meghatározott TCR-értékek elkerülik az óceáni hófelvétel bizonytalanságainak problémáit és a hosszabb távú visszacsatolási folyamatok (pl. jégtakarók) időléptékeiből adódó egyensúlyi állapotok meghatározásának homályos határát. A TCR-t jobban korlátozza a történelmi felmelegedés, mint az ECS-t. Az AR6 a TCR nagyon valószínű tartományát 1,2–2,4 °C-nak becsülte. Az ECS-sel ellentétben a TCR felső határa szigorúbban korlátozott. Összehasonlításképpen, a Lewis (2023) által meghatározott TCR-értékek 1,25–2,0 °C között vannak, ami sokkal jobb egyezést mutat az AR6 értékekkel, mint amit az ECS-értékek összehasonlításakor láthattunk.

Hivatkozások

- Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end ‘climate sensitivity’ can now be ruled out. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out>
- Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC’s sixth assessment report on climate science. <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science>
- Chen, D., et al. (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In Thermodynamics of atmospheres and oceans (pp. 351–385). Academic Press.
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. Climate Change Economics April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. Environmental Economics and Policy Studies <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Forster, P., et al. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

- Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O'Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. *Climate Dynamics*, 62(1–2), 229–246. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7>
- Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>
- Lewis, N. (2025). Comment on “Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?” by Sherwood and Forest (2024). *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179>
- Thorsten Mauritsen et al., (2012) “Tuning the Climate of a Global Model,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 4, no. 3 <https://doi.org/10.1029/2012ms000154>
- Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002037. <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6(6), 415–416. <https://doi.org/10.1038/ngeo1836>
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629-632. <https://doi.org/10.1126/science.1144735>
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. *Climate*, 9(11), 161. <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? *Nature Climate Change* 1, 23–24, <https://doi.org/10.1038/climate.2007.22>
- Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>
- Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 2679–2686. <https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024>
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>
- Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*, 19(14), 3354–3360. <https://doi.org/10.1175/jcli3799.1>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

5 ELTÉRÉS A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

Fejezet-összefoglaló

A klímamodellek elmúlt évtizedekre visszamenő alkalmazása számos vonatkozásban felmelegedési torzítást mutat. A kényszertényezők becsült változásaira túl nagy földfelszíni felmelegedés adódik (a legalacsonyabb ECS klímaértékű modellek kivételével), a modellben túl nagy a felmelegedés az alsó és a középső troposzférában, valamint felfelé túl nagy az erősítés.

A klímamodellek az amerikai kukoricaövben túl nagy közelmúltbeli sztratoszférikus lehűlést, érvénytelen félgömbi albedó értékeket, túl nagy hőveszteséget és túl nagy felmelegedést is mutatnak. Az IPCC elismerte ezen problémák némelyikét, de nem mindegyiket.

5.1 Bevezetés

Az antropogén üvegházgázok légköri szintjének emelkedésére bekövetkező jövőbeli klímaváltozások előrejelzésének elsődleges eszközei a klímamodellek. Annak felméréséhez, hogy a klímamodellek alkalmasak-e erre a célra, ésszerű feltenni azt a kérdést, hogy a modellek mennyire jól adják vissza a jelenlegi éghajlatot és annak változásait az elmúlt évszázad folyamán. Az „Éghajlatmodellezés” című keretes rész részletesen ismerteti a klímamodellek működését.

Kiemelt aggodalomra ad okot az a tény, hogy miután több évtizeden át, körülbelül három tucat modellel dolgoztak a világ kutatóközpontjai, a légköri CO₂ hipotetikus megduplázódására adott válaszként bekövetkező jövőbeli felmelegedés modellezett mértékeiben egymáshoz képest több mint háromszoros szorzótényezők is vannak, amint azt az előző fejezetben tárgyaltuk. A modellek közötti eltérések e tartománya évtizedek óta nem csökkent.

A klímamodellek nemcsak a jövővel kapcsolatos nézeteltéréseik miatt problémásak, hanem abban a tekintetben is, hogy képesek-e a közelmúltbeli eseményeket jól visszaadni. E fejezetben áttekintjük a klímamodellek pontosságának néhány legfontosabb mérőszámát: a történelmi felszíni, a troposzférabeli és a sztratoszférabeli hőmérsékleti trendek reprodukálási képességét; a vertikális felmelegedési profil reprodukálási képességét; és más éghajlati jellemzők, például a havazás reprodukálásnak képességét. Mindegyik esetre érvényes az a megállapítás, hogy a becsült múltbeli kényszertényezőkre adott válaszként a modellátlagok a túl nagy felmelegedés felé tévednek el.

TUDÁSDOBOZ: Klímamodellezés

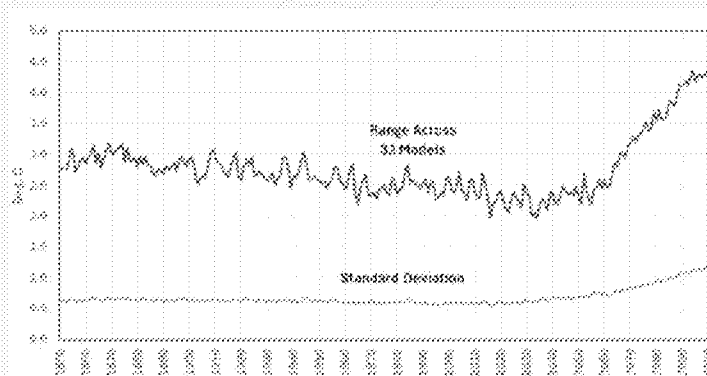
Az összes klímamodell (a legegyszerűbb kivételével) a Föld szárazföldi felszínét egy körülbelül 100 km-es négyzetrács segítségével ábrázolja. A légkör szimulálásához e négyzetek felett jellemzően 30, esetleg annál több rácsdobozt helyeznek el. Az óceánt hasonló, de finomabb ráccsal modellezzik. A légkört és az óceánokat több tízmillió rácsdobozra osztják fel.

A fizikai törvényeken alapuló számítógépes modellek kiszámítják, hogyan mozog a levegő, a víz és az energia a rácsdobozok között az idő múlásával. Az időlépés akár 10 perc is lehet, és ennek a folyamatnak több milliónyi ismétlése lehetővé teszi az éghajlat évszázadokon át tartó szimulációját. Ezeknek a modelleknek a lefuttatása még a legerősebb szuperszámítógépeken is hónapokig eltarthat. A szimulációs eredmények összehasonlítása a történelmi éghajlati adatokkal segít felmérni a modell pontosságát, míg a jövőbe mutató előrejelzéssel becslést adnak a feltételezett emberi és természeti hatásokra bekövetkező éghajlatváltozásra.

Annak ellenére, hogy egyszerűnek hangzik, az éghajlatmodellezés rendkívül összetett. Számos kritikus folyamat a rácsméretnél kisebb léptékben zajlik. Például a napfény és a hő áramlása a légkörben erősen függ a felhőzettől. Mivel az egyes felhők nyomon követése nem járható út, a kutatóknak „alrácsos” feltételezéseket kell tenniük a felhők eloszlásáról az egyes rácsdobozokban. A hó- és jégtakaró, ami azt befolyásolja, hogy mennyi napfény verődik vissza vagy nyelődik el a felszínen, egy másik alrácsos feltételezést jelent.

Minden egyes alrácsos feltételezéshez numerikus paraméterekre van szükség, amelyeket gondosan be kell állítani. A modellezők kezdetben a fizika és a megfigyelt éghajlati minták alapján becsülik meg ezeket a paramétereket, majd lefuttatják a modellt. Mivel a kezdeti eredmények gyakran jelentősen eltérnek a valós megfigyelésektől, ezeket a paramétereket „hangolják”, hogy a megfigyelt éghajlati jellemzőkhöz jobban illeszkedjenek. A különböző modellezőcsoportok eltérő feltételezéseket és hangolási stratégiákat alkalmaznak, és ez vezet eltérő eredményekre. A hangolás a klímamodellezés szükséges, de kényes oldala, mint minden összetett rendszer esetében. A rossz hangolás pontatlan szimulációkhoz vezethet, míg a túlzott hangolás azzal a kockázattal jár, hogy az eredményeket mesterségesen tereli előre meghatározott következtetések felé.

A jelenlegi éghajlat modellreprezentációinak skálája nagyon széles. Az egyik legalapvetőbb mutató – a Föld átlagos felszíni hőmérséklete – körülbelül 3°C-kal változik a CMIP6 modellekben 1880 előtt (5.1. ábra), majd 2040-ig kissé szűkül, ezután több mint 4°C-ra divergál. Összehasonlításképpen: a 20. századi felmelegedés csak körülbelül 1,0°C volt. Ez az eltérés arra utal, hogy a modellek fizikai folyamatai között jelentős különbségek vannak.



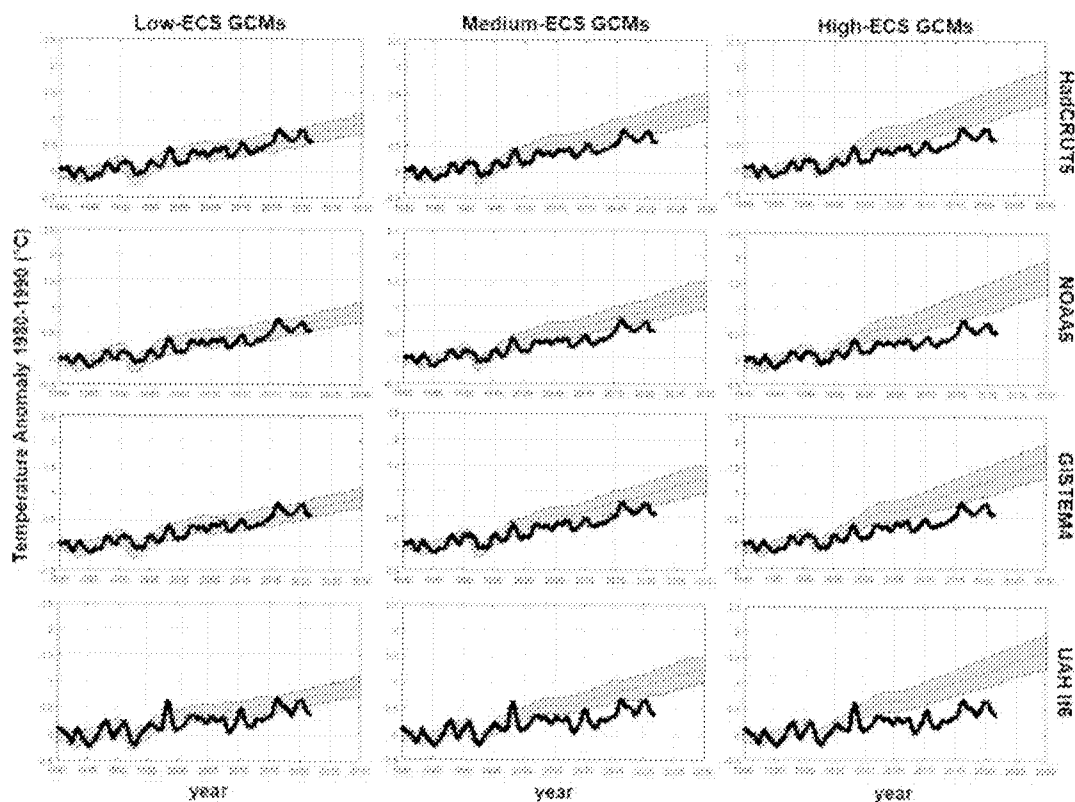
5.1. ábra: CMIP6 Átlagos felszíni hőmérséklet tartománya 33 modellben és szórás az SSP5-85 forgatókönyv alapján. Adatok a KNMI Climate Explorer weboldaláról: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>

A modellek azon képességén túl, hogy leírják a mai éghajlat jellemzőit, a társadalom számára kritikus kérdés az, hogy mennyire jól jelzik előre a nehezen megfogható emberi hatásokra (például az üvegházgáz-kibocsátásra, az aeroszol általi hűtésre és a földhasználat változásaira) adott válaszokat. A legfontosabb szempont, amelyet a modelleknek helyesen kell rögzíteniük, a „visszacsatolások”. Ezek akkor fordulnak elő, amikor az éghajlatváltozás vagy felerősíti, vagy elnyomja a további felmelegedést. Általánosságban elmondható, hogy az összes visszacsatolás modellezett nettó hatása a CO₂ közvetlen felmelegedési hatását megduplázza, sőt megháromszorozza.

5.2 Felszíni felmelegedés

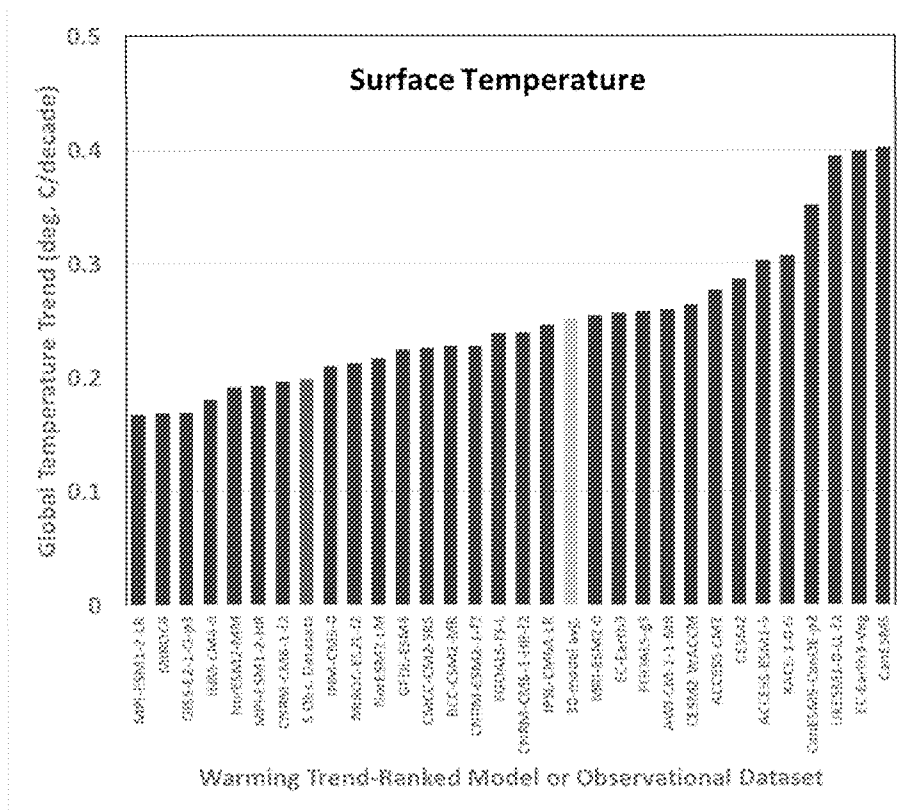
Egy klímamodell érvényességének egyszerű tesztje az, hogy képes-e reprodukálni a történelmi felmelegedést az olyan ismert múltbeli éghajlati tényezők változásaira adott válaszként, mint az üvegházgázok. Az 5.2. ábra Scafetta (2023) munkájából származik, amely a legújabb generációs (CMIP6) klímamodelleket alacsony ECS (1,5–3,0 °C), közepes ECS (3,0–4,5 °C) és magas ECS (4,5–6,0 °C) kategóriákba csoportosítja, és összehasonlítja az 1980 utáni globális átlaghőmérsékleti szimulációs tartományait három felszíni hőmérsékleti idősor és egy műholdas alsó troposzféra hőmérsékleti adatsor tartományaival.

A bal szélső oszlop azt mutatja, hogy az alacsony ECS-modellek meglehetősen jól követik az 1980 utáni történelmi felmelegedési megfigyeléseket, a középső és a jobb oldali oszlop viszont azt mutatja, hogy a közepes és magas ECS-modellek a felmelegedést feltűnően túlbecsülik.



5.2. ábra: Modelleredmények összehasonlítása a Föld felszíni felmelegedésére vonatkozó megfigyelésekkel. Az oszlopok alacsony ECS-t (13 modell), közepes ECS-t (11 modell) és magas ECS-t (14 modell) mutató modellcsoportoknak felelnek meg, míg a sorok széles körben használt megfigyelt hőmérsékleti idősorokat mutatnak. Az első három felszíni átlagokat, a negyedik pedig az alsó troposzféra átlagát mutatja. Minden panelen a sárga szín jelöli az adott csoportra vonatkozó klímamodell-szimulációk átlagát és tartományát ($\pm$ egy szórás). A vastag fekete vonal a jelzett rekordban megfigyelt éves átlaghőmérsékletet ábrázolja. Forrás: Scafetta (2023) 2. ábra.

Spencer (2024) ugyancsak hasznos összefoglalást adott a modellek és a megfigyelések közötti eltérésekről: összehasonlította a felszínhőmérsékleti adatsor trendjét az egyes klímamodellekben szereplő trenddel, amint azt az 5.3. ábra foglalja össze; a legtöbb klímamodell az 1979 óta végzett megfigyeléseknél lényegesen nagyobb felmelegedést mutat.



5.3. ábra: Globális felszíni levegőhőmérsékleti trendek (°C/évtized), 1979-2024, különböző CMIP6 klímamodellekből (piros; 30 modell átlaga: narancssárga); valamint kékkel jelölt három hőmérsékleti adatsor (HadCRUT5, NOAA Global Temp és Berkeley 1 deg.) és két újrafeldolgozási adatsor (ERA5 és NCEP/NCAR R1) átlaga. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>.

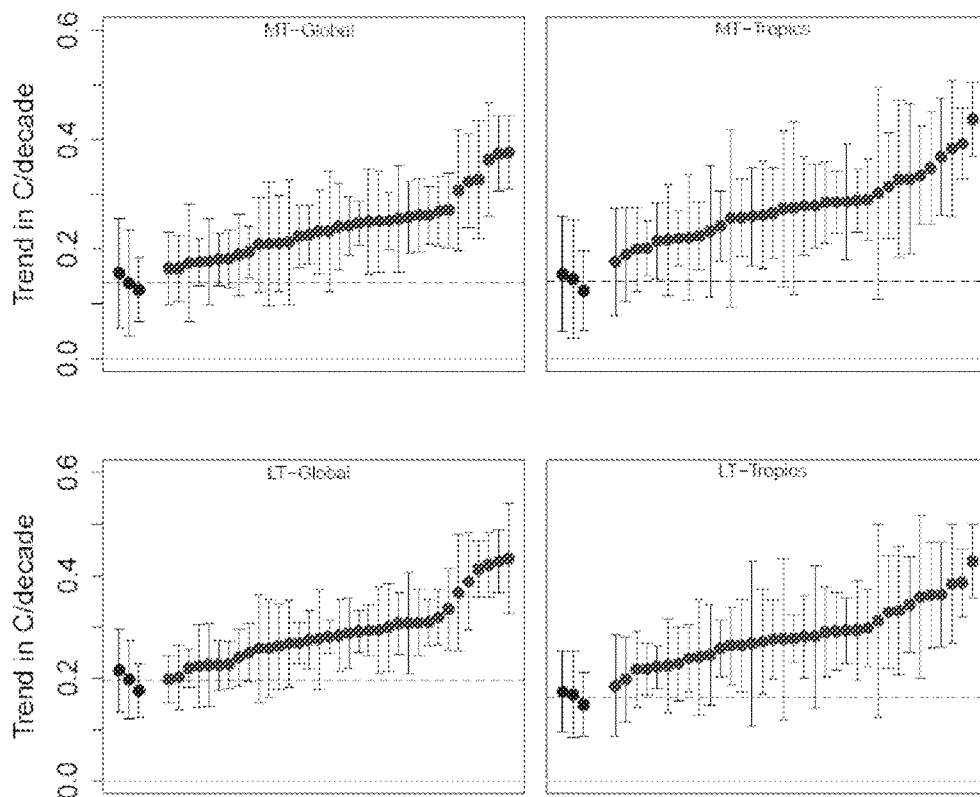
5.3 Troposzférai melegedés

Régóta ismert, hogy az éghajlati modellek átlaga túlbecsüli a trópusi troposzférában bekövetkező felmelegedést. E régió fontos tesztje az éghajlati modelleknek, mivel itt jelenik meg először és a legerősebben az antropogén üvegházhatású felmelegedés jele. A troposféra-trendekben mutatkozó torzítások a hőátadási folyamatokban meglévő olyan modellhibákat jeleznek, amelyek a felszíni felmelegedési torzításokra is átragadnak.

Az eltérést az első amerikai klímaváltozási tudományos programjelentésben (Karl et al. 2006) súlyos következtetlenségként jelölték meg, és azóta minden IPCC-jelentésben megemlítették, de az eltérés az idő múlásával egyre súlyosbodott, és az eltérés ma már globális. McKittrick és Christy (2020) összehasonlították a CMIP6 klímamodellekben megfigyelt troposféra-felmelegedési trendeket a műholdakról, meteorológiai léggömbökből és újrafeldolgozási rendszerekből megfigyelt trendekkel. Az 1979-2014 közötti átlagos megfigyelt felmelegedési trendet mindegyik modell túlbecsülte mind az alsó, mind a középső troposféra rétegeiben, mind globálisan, mind a trópusokon. A legtöbb egyedi modellben az eltérés statisztikailag szignifikáns volt, és a modellek átlagában is nagyon szignifikáns.

Az 5.4. ábra a 2024-ig frissített adatokkal való összehasonlítást mutatja be (McKittrick és Christy 2025). Az utóbbi meleg évek kissé felfelé mozdították a megfigyelt trendet, és kiszélesítették a trend konfidencia intervallumait, de az általános minta ugyanaz marad: a modell túl nagy felmelegedés felé tér el, a legtöbb esetben a különbség statisztikailag szignifikáns, és az átlagos eltérés statisztikailag nagyon szignifikáns. McKittrick és Christy (2020) azt is kimutatták, hogy az eltérés

nagyobb a magas ECS-értékű modellekben, de még az alacsonyabb átlagos ECS-értékű modellek is túl nagy felmelegedést jósolnak. Ha a jövőbeli klímamodellek realisztikusan ábrázolnák a globális troposzféra- felmelegedést, valószínűleg kevésbé lennének érzékenyek, mint a CMIP6 modellegyüttes alacsony ECS-értékű tagjai.



5.4. ábra: A megfigyelt és a CMIP6 modellezett felmelegedési trendek ($^{\circ}\text{C}/\text{évtized}$, 1979-2024) a globális és trópusi alsó (LT) és középső troposzférában (MT), McKittrick és Christy (2020) módszertanát alkalmazva, 2014 és 2024 közötti adatokkal frissítve. Kék pontok: felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 3 adattermék (rádiószondák, újraelemzés és műholdak) esetében. Kék szaggatott vonal: a felmelegedési trend átlaga 3 megfigyelt sorozat esetében. Piros pontok: modellezett felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 35 modellben, a legalacsonyabbtól a legmagasabbig rendezve.

Amint azt korábban említettük, az IPCC régóta elismeri a modellek és a megfigyelések közötti eltérést. Például az AR6 443-444. oldala a trópusi troposzféáról ezt állítja (a globális összehasonlítással nem foglalkozik):

Az AR5 óta számos tanulmány továbbra is ellentmondást mutatott ki a szimulált és a megfigyelt hőmérsékleti trendek között a trópusi troposzférában, a modellek nagyobb mértékű felmelegedést szimuláltak, mint megfigyelések (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; McKittrick és Christy, 2018; Po-Chedley et al., 2021)... Az 1979–2014 közötti időszakban a modellek jobban összhangban vannak az alsó troposzférában végzett megfigyelésekkel, és a legkevésbé a felső troposzférában, 200 hPa körül, ahol az eltérések meghaladják az évtizedenkénti $0,1^{\circ}\text{C}$ -ot. Számos, CMIP6 modelleket használó tanulmány arra utal, hogy az éghajlati érzékenységbeli különbségek fontos tényezők lehetnek a szimulált és a megfigyelt troposzférikus hőmérsékleti trendek közötti eltérésben (McKittrick és Christy, 2020; Po-Chedley et al., 2021), bár nehéz dekonvolúciózni az éghajlati érzékenység, az aeroszol-kényszer változásainak és a belső

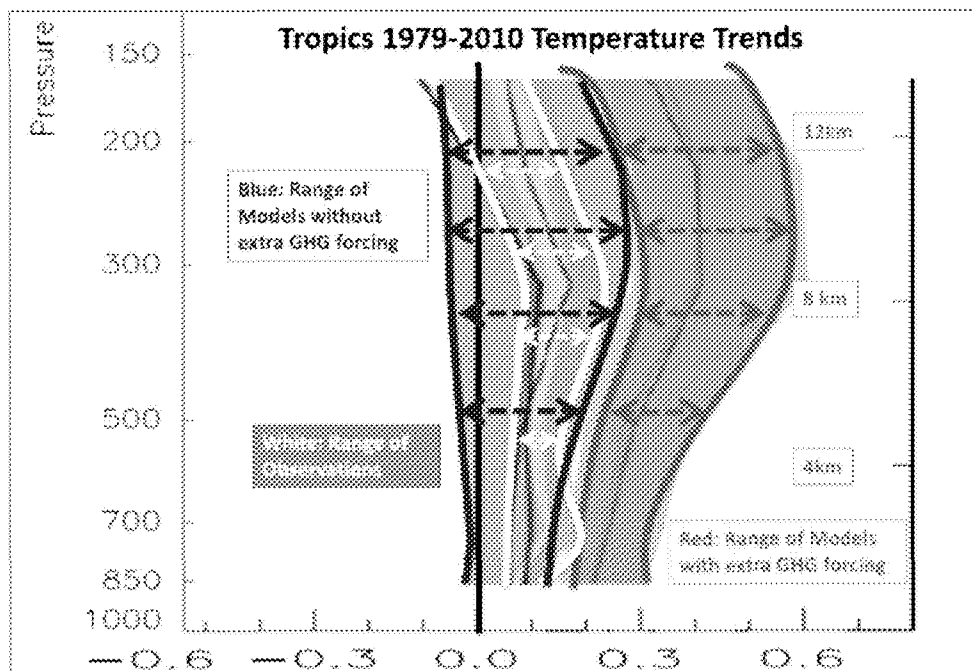
változékonyságnak a troposzférikus felmelegedési eltérésekhez való hozzájárulását (Po-Chedley et al., 2021). Egy másik tanulmány megállapította, hogy egy feltételezett negatív trópusi felhő-visszacsatolás hiánya az egyik modellben a felső troposzféra felmelegedési eltéréseinek felét magyarázhatja (Mauritsen és Stevens, 2015).

... Összefoglalva, a tanulmányok továbbra is úgy találják, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellszimulációk erősebben melegszenek, mint ahogy azt a trópusi közép- és felső troposzférában az 1979–2014 közötti időszakban végzett megfigyelések mutatják (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; Suárez-Gutiérrez et al., 2017; McKittrick és Christy, 2018), és hogy részben a túlbecsült felszíni felmelegedés felelős (Mitchell et al., 2013; Po-Chedley et al., 2021). Ezért *közepes megbízhatósággal* értékeljük úgy, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellek a felső trópusi troposzférában megfigyelt felmelegedést az 1979–2014 közötti időszakban továbbra is legalább 0,1°C-kal túlbecsülik.

Figyelemre méltó, hogy a túlzott modellfelmelegedésre utaló bizonyítékok felhalmozódása ellenére az IPCC a felmelegedési torzítás létezését csak *közepes megbízhatóságúnak* tekinti.

5.4 Eltérések a függőleges hőmérsékleti profil mentén

Egy másik fontos eltérés jelent a modellek és a megfigyelések között a klímamodellekben található magassággal való túlzott erősítés. Az összehasonlítás az AR5 10. fejezetében szerepelt, bár csak az online kiegészítésben (10.SM.1. ábra), és csak egy olyan ábrán, amelynek formázása elfedte a lényegét. A 10.SM.1. ábrára sem a fő IPCC-jelentésben, sem az összefoglalóban nem hivatkoznak, így az olvasók nem vehették észre. Bár első pillantásra nem nyilvánvaló, azt mutatja, hogy az alsó troposzférában az 1979-2010 közötti felmelegedés olyan kicsi, hogy összhangban van azzal, hogy nincs üvegházgáz-kényszer, és nem egyezik azokkal a modellfuttatásokkal, amelyek üvegházgáz-kényszert feltételeznek. Az 5.6. ábrán átdolgoztuk az IPCC AR5 10.SM.1. ábráját, hogy kiemeljük ezt a kritikus pontot.

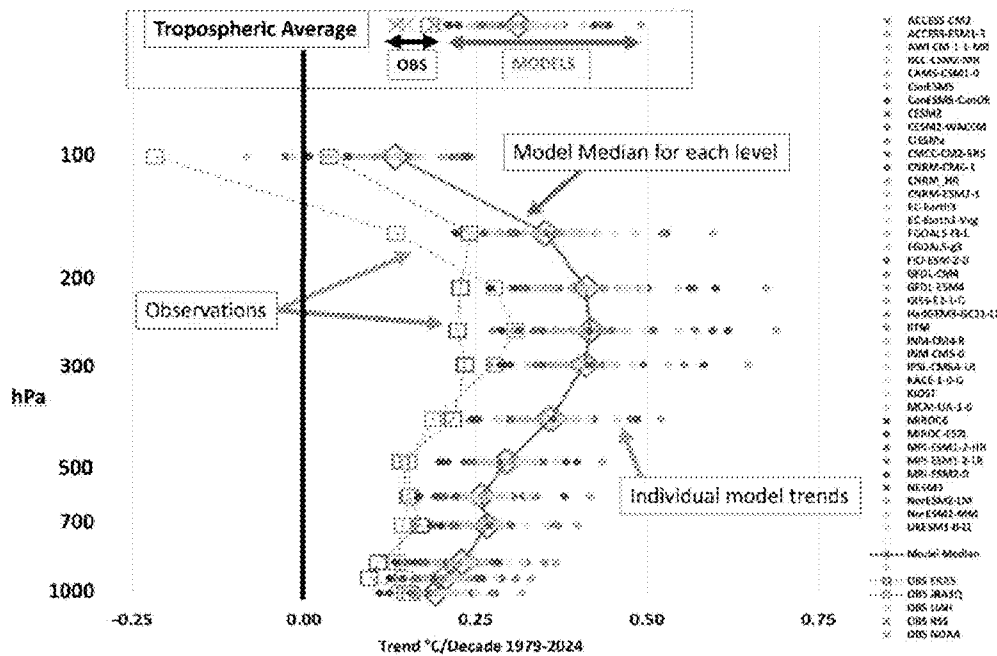


5.5. ábra: Függőleges melegedési mintázat a trópuson (a déli szélesség 20° és az északi szélesség 20° között). Vízszintes tengely: °C/évtized. Forrás: Az IPCC AR5 annotált verziójának 10.SM.1 ábrája

Az 5.5. ábra összehasonlítja a modell és a megfigyelés hőmérsékleti trendjeit a déli földrajzi szélesség 20° és az északi szélesség 20° között (a trópusi övezetben), a magasság függvényében. Ebben a régióban, ahol a modellek szerint a felmelegedésnek a legerősebbnek kellene lennie, a megfigyelések (itt fehér színnel jelölve) a kék „Nincs CO₂” sávon belül, és teljes mértékben a „CO₂-vel” piros burkológörbén kívül esnek. Ez azt jelenti, hogy a teljes trópusi légköri oszlopban, a felszíntől a sztratoszféra aljáig, a megfigyelt felmelegedési trendek olyan kicsik, hogy összhangban vannak az antropogén CO₂-t nem tartalmazó modellek kimenetével, és kívül esnek a megnövekedett CO₂-tartalommal kényszerített modellek által generált felmelegedési trendek teljes burkológörbében.

Hasonló összehasonlítást végzett Christy és McNider (2017), aminek frissített változatát (1979-2024) az 5.6. ábra mutatja be. A modellezett hőmérsékleti trendek meghaladják a felszíntől a troposzféra tetejéig tartó megfigyeléseket, a megfigyelt trendek a legtöbb nyomásszinten a teljes modelltartomány alatt vannak. Az 5.6. ábrán látható a három műholdas adatkészlet (NOAA, UAH és RSS) trópusi troposzférikus hőmérsékleti (TTT) átlaga is, összehasonlítva az 1979-2024 közötti éghajlati modellek ugyanazon rétegének átlagával. A megfigyelt trendek ismét teljesen a modelltartomány alatt helyezkednek el.

A modellezők által a modellekben zajló fizikai folyamatok jellemzésére hozott döntések széles skáláját (lásd a fenti 5.1. szakaszban a Klímamodellkezés című keretes írást) a középső troposzférában megfigyelhető trendek nagy szórása mutatja, ami medián ± 40 százaléka (5.6. ábra). Ez élénken illusztrálja a bizonytalanságokat a turbulenciát, a nedvességgel kapcsolatos termodinamikát és az energiafluxusokat magában foglaló komplex rendszer modellezésére (paraméterezésére) tett kísérletekben a trópusi légkör idő- és térléptékeinek teljes tartományában.



5.6. ábra: Modellezett és megfigyelt melegedés trópusi troposzférában. Forrás: a 2024-es adatokkal is frissített Christy és McNider (2017). Zöld és kék vonalak: újrafeldolgozott megfigyelési idősorok.

Ez az eltérés sok vitát váltott ki, egyesek azzal érvelnek, hogy még ha a trópusokon nagyon kevés felmelegedést is figyelnek meg a magasban, akkor is létezik egy „forró pont” abban az értelemben, hogy a magasban a felmelegedés nagyobb, mint a felszínen (Santer et al. 2008). De erős bizonyítékok léteznek arra, hogy a modellek az erősítési rátát is eltúlozzák. Klotzbach et al. (2009) kimutatták, hogy a modellek nagyobb erősítést vetítenek előre a magasság függvényében, mint amennyit megfigyelnek. Ezt az eredményt később részletes idősoros elemzéssel (Vogelsang és Nawaz 2016) is megerősítették: kimutatták, hogy a modell és a megfigyelések közötti különbség statisztikailag szignifikáns.

A légkör hőmérsékleti profilja esetében a modellek nemcsak bizonytalanok, hanem a megfigyelésekhez képest közös felmelegedési torzítást is mutatnak. Ez bizonyos alapvető visszacsatolási folyamatokat téves felfogására utal.

Az IPCC AR6 ezt a kérdést nem vizsgálta.

5.5 Sztratoszférikus hűlés

Az antropogén klímaváltozás várható általános „ujjlenyomatának” fontos eleme a troposzféra felmelegedésének és a sztratoszféra lehűlésének egyidejű folyamata. Ez utóbbi jellemzőt az ózonréteg csökkenése és helyreállása is befolyásolja. Az AR6 elismerte, hogy lehűlést csak 2000-ig figyeltek meg. Azóta a sztratoszféra némi felmelegedést mutat, ellentétben a modell-előrejelzésekkel.

Az AR6 WG1 2. fejezet 327-9. oldala kimondja:

A teljes alsó sztratoszférában (körülbelül 10–25 km) az átlaghőmérséklet 1980 és 2019 között az összes adatot illetően csökkent, a csökkenés nagy része 2000 előtt történt. A csökkenés akkor is fennáll, ha eltávolítjuk az El Chichon (1982) és a Pinatubo (1991) vulkánkitörések trendre gyakorolt hatását, amelyről Steiner et al. (2020a) megállapították, hogy az 1979–2018 közötti lehűlési trendet évtizedenként 0,06°C-kal növelte. A 2000–2019 közötti időszakban a legtöbb

adathalmaz nem mutat jelentős trendet, még csak csak marginálisan jelentős trendet sem. Philipona et al. (2018) eredményei pedig gyenge növekedést mutatnak a 2000–2015 közötti időszakban a rádiószondákkal mintavételezett legalsó sztratoszférában....

Gyakorlatilag biztos, hogy az alsó sztratoszféra a 20. század közepe óta lehűlt. A legtöbb adathalmaz azonban azt mutatja, hogy az alsó sztratoszféra hőmérséklete az 1990-es évek közepe óta stabilizálódott, és az elmúlt 20 évben nem történt jelentős változás. Valószínű, hogy a középső és felső sztratoszféra hőmérséklete 1980 óta csökkent, de a nagyságrendet illetően alacsony a megbízhatóság.

A hivatkozott forrás, Philipona et al. (2018) a „Rádiószondák azt mutatják, hogy évtizedekig tartó lehűlés után az alsó sztratoszféra most melegszik” című cikkében kijelentette:

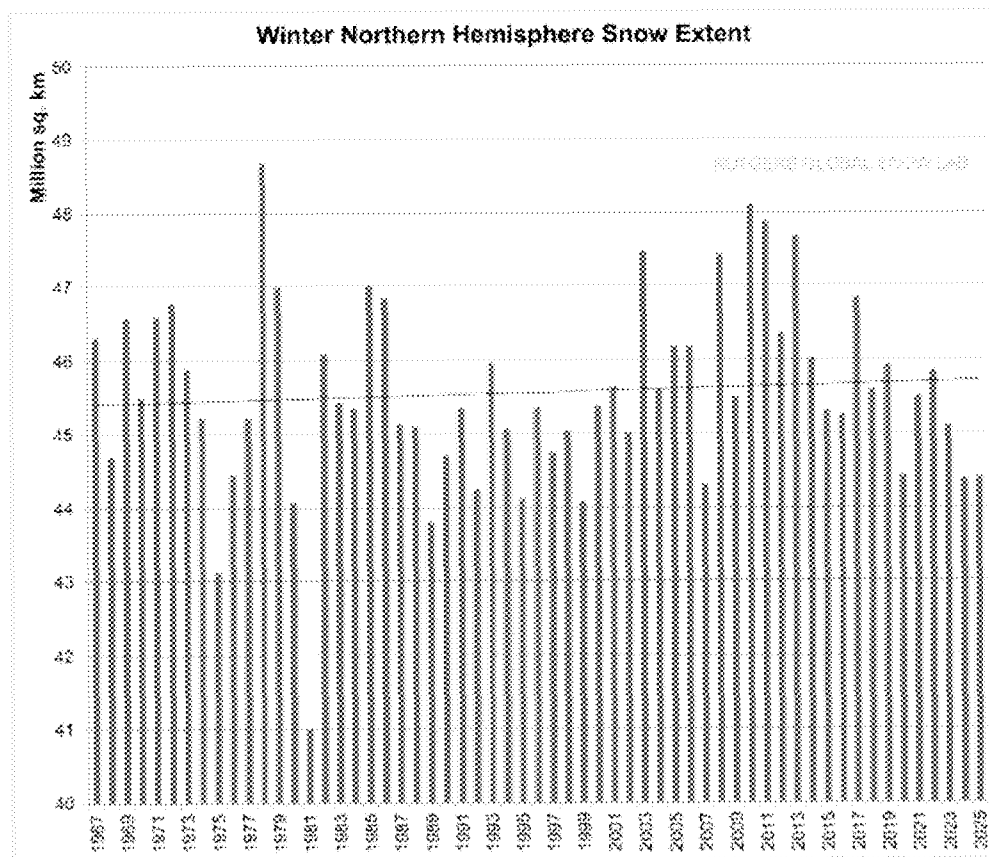
Az üvegházgázok folyamatos növekedésére és a sztratoszféra ózonrétegének elvékonyodására válaszul a klímamodellek az elkövetkező évtizedekben a troposzféra folyamatos felmelegedését és a sztratoszféra lehűlését vetítik előre. Az alsó sztratoszféra hőmérsékletének globális átlagos műholdas megfigyelése a századforduló óta nem mutat jelentős trendet. Ezzel szemben 60 állomás vertikálisan felbontott rádiószondás méréseinek elemzése az alsó sztratoszféra hőmérsékletének emelkedését mutatja a századforduló óta 15 és 30 km közötti magasságban és a legtöbb kontinensen. A trendbecslés némileg érzékeny a homogenitásértékelési döntésekre, de az alsó sztratoszférában az összes vizsgált rádiószondás adatkészlet a 20. század végi lehűlésről a 21. század eleji felmelegedésre való változást sugallja.

Santer et al. (2023) frissített adatokat is felhasznál annak kimutatására, hogy az alsó sztratoszférában a lehűlési trend nem jelent meg újra.

A troposzférikus felmelegedés és a sztratoszférikus lehűlés kombinációja az antropogén klímaváltozás gyakran emlegetett „ujjlenyomata”. A sztratoszféra-felmelegedés 2000 óta egybeesik a folyamatos felszíni és troposzférikus felmelegedéssel, efféle mintázat a klímamodell-szimulációkban nincs, és nyilvánvalóan nem egyeztethető össze az antropogén ujjlenyomattal.

5.6 Eltérések a hótakaróban

A Rutgers Egyetem Hólaboratóriuma által összeállított adatok szerint az északi félteke téli hótakarója nem csökken (5.7. ábra); sőt, inkább emelkedő tendenciát mutat.



5.7. ábra: Az északi félteke téli hótakarójának kiterjedése. Forrás: https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhl&ui_season=1 (hozzáférés: 2025. május 27.)

A modellek mégis az északi félteke hótakarójának csökkenését vetítik előre egy melegedő éghajlaton, ahogyan azt Connolly et al. (2019) is leírták.

A klímamodellek rosszul magyarázták a megfigyelt trendeket [az északi félteke hótakarójában]. Míg a modellek azt sugallják, hogy a hótakarónak mind a négy évszakban folyamatosan kellett volna csökkennie, csak a tavasz és a nyár mutatott hosszú távú csökkenést, és a megfigyelt csökkenések mintázata ezekben az évszakokban meglehetősen eltért a modellezett előrejelzésektől. Ezenkívül az őszi és téli megfigyelési trendek hosszú távú növekedésre utalnak, bár e trendek statisztikailag nem szignifikánsak.

Az AR6 nagyrészt a tavaszi szezonra korlátozza az északi félteke hótakarójának kiterjedésével (SCE) kapcsolatos tárgyalását, amelyre vonatkozóan a modellek és a megfigyelések csökkenő tendenciát mutatnak. A téli változásokról a következő megjegyzést teszi (AR6 WGI 2. fejezet, 344. o.):

Az északi féltekén (az NH-ban) 1978 óta tapasztalható SCE-trend értékelése azt mutatja, hogy az októbertől februárig tartó időszakban jelentős bizonytalanság van a trendben, ahol az előjel a megfigyelési szorzattól függ. A NOAA Éghajlati Adatrekordját használó elemzés az októbertől februárig tartó SCE növekedését mutatja (Hernández-Henríquez et

al., 2015; Kunkel et al., 2016), míg a műholdakon elhelyezett optikai érzékelőkön (Hori et al., 2017) vagy a több megfigyelésen alapuló termékeken (Mudryk et al., 2020) alapuló elemzések negatív tendenciát mutatnak minden évszakban.

Az AR6 WGI 9. fejezete (1284. o.) arra mutat rá, hogy a NOAA klímaadat-nyilvántartása, amely az őszi és téli SCE növekedését mutatja, ellentmond a szárazföldi megfigyeléseknek és a modellalapú adatkészleteknek. Megjegyzi, hogy az optikai műholdképek használata a téli SCE megállapítására kihívást jelent a felhőzet és a téli hónapokban csökkenő napsugárzás miatt. A csendes-óceáni part menti államokra (CA, OR és WA) összpontosítva a hideg évszakban a tavasszal és nyáron elolvadó hegyi havazás a meleg évszak vízkészletének jelentős részét biztosítja. A fő forrásrégiók (Kaskádok és Sierra Nevada hegység) havazásának átfogó rekonstrukciója az éves összesítésekben a 19. század vége óta nem mutat jelentős tendenciákat (Christy 2022).

Összefoglalva, a naprakész Rutgers SCE adatbázis eltérést mutat a modellek és a megfigyelések között. További munkára van szükség a megfigyelési adatkészletekben lévő ellentmondásos trendek összeegyeztetésére.

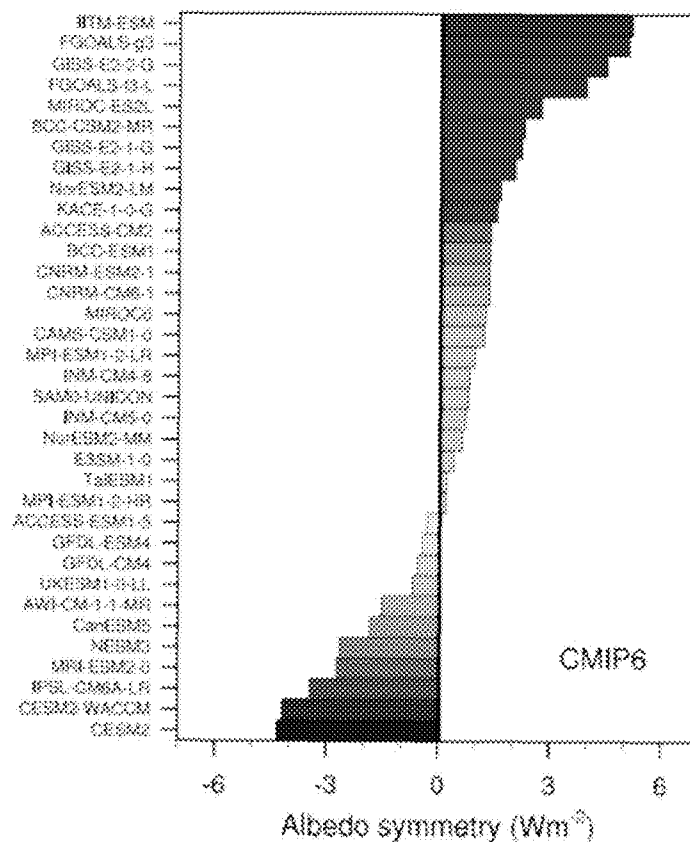
5.7 A planetáris albedó félgömbi szimmetriája

A bolygóalbedó a bejövő napsugárzásnak a Föld által az űrbe visszavert hányada. Fontos eleme a sugárzási energiaegyensúlynak, és befolyásolja, hogy a bolygó idővel felmelegszik-e vagy lehűl. A bolygóalbedót jellemzően 0,30 körüli értékre becsülik; a 0,01-es léptékű változások napenergia-kényszerben körülbelül 3 W/m²-es változásnak felelnek meg, ami nagyobb, mint a jelenlegi antropogén kényszer. Régóta megfigyelték, hogy a modellek egymásnak és a globális bolygóalbedó értékével kapcsolatos megfigyeléseknek is ellentmondanak (Stephens et al. 2015).

A földi albedó érdekes tulajdonsága, hogy az északi félteke (NH) és a déli félteke (SH) közel azonos átlagos albedóval rendelkezik, legalábbis az ötven éve folyó műholdmegfigyelés szerint (Stephens et al., 2015). E szimmetria meglepő, mert az SH-n sokkal több óceán van, mint szárazföld. Mivel az óceán kevésbé fényvisszaverő, mint a szárazföld, az NH-nak nagyobb értékű albedóval kellene rendelkeznie. A felhőzet (ami erősen fényvisszaverő) gyakoribb az északi féltekén, és a két félteke felszíni albedóegyensúlyának eltérései a felhőzet által kompenzálódik. Datseris és Stephens (2021) kimutatták, hogy e felhőkompenzáció a déli félteke trópusvidéken kívüli viharpályáiból származik, amelyek felhősebbek, mint az északi féltekén. Bár ennek a féltekei szimmetriának a mechanizmusa nem tisztázott, valószínűleg nagy időbeli és térbeli léptékekben működik.

Az albedó féltekei szimmetriája az éghajlati modellekhez egy egyszerű bruttó mérőszámot szolgáltat. Rugenstein és Hakuba (2023) ezt a mérőszámot az északi és a déli félteke éves átlagos albedói közötti különbségként definiálták, a visszavert napfény Wm⁻²-ben kifejezve, és odaszervezhető a CMIP6 éghajlati modellekhez, ahogy az az 5.8. ábrán látható. A legtöbb CMIP6 modell nem adja vissza a megfigyelt kis aszimmetriát (kb. 0,1 Wm⁻²), sőt abban sem értenek egyet, hogy melyik félteke veri vissza jobban a fényt. Ráadásul az aszimmetria nagysága egyes modellekben akár 5 Wm⁻²-t is elérhet, ami a jelenlegi antropogén kényszernek kétszerese (körülbelül 2,7 Wm⁻²).

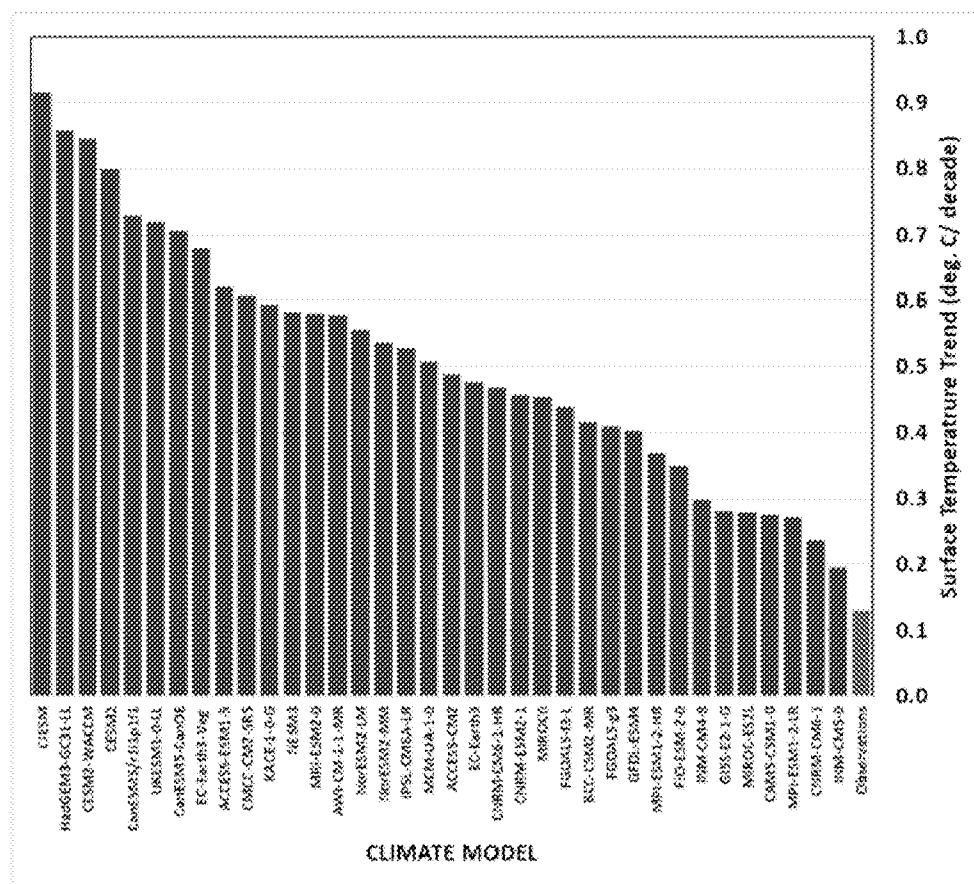
A nem fizikai albedóaszimmetriák jelentősége az éghajlati modellekben még nem teljesen ismert. Más modellvizsgálatok azonban arra utalnak, hogy az albedó féltekei közötti változásai megváltoztathatják a pólusok felé irányuló hőáramokat, a meridionális hőmérsékleti gradienseket, a viharosságot és a féltekei óceánok hőtárolási különbségeit. A modellek és a megfigyelések közötti eltérés további vfel kérdéseket vet fel a felhő-visszacsatolási folyamatokkal kapcsolatban, és így még általánosabb érvénnyel csökkenti a jövőbeli éghajlati modell-előrejelzéseinek megbízhatóságát.



5.8. ábra: A 20 éves átlagos fényvisszaverőkéesség (albedo) különbségei az északi és a déli félteke között a legutóbbi IPCC-értékelésben használt CMIP6 modellek esetében (színes oszlopok). A nagyon kis megfigyelt különbséget a függőleges fekete vonal jelzi. Rugenstein és Hakuba (2023) nyomán.

5.8 Az USA kukoricaövezete

A modellek és a megfigyelések közötti egyik legnagyobb eltérés az USA kukoricaövezetében található, ami a globális élelmiszertermelés szempontjából különösen fontos régiónak számít. Az 5.9. ábra a nyári (június, július, augusztus) felmelegedési trendeket mutatja a 12 államból álló kukoricaövezetben (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) 1973 és 2022 között. A megfigyelésekhez (kék) képest mind a 36 klímamodell (piros) túl gyors melegedést mutat.



5.9. ábra: Modellezett és megfigyelt felmelegedési trendek az USA kukoricaövezetében, 1973 és 2022 között.

Amint azt a 9. fejezetben tárgyaltuk, az emelkedő hőmérsékletnek az USA kukorica hozamára gyakorolt várható negatív hatásai mindmáig nem valósultak meg, ellentétben azokkal a széles körben nyilvánosságra hozott tanulmányokkal, amelyek azt állítják, hogy az elméleti jövőbeli hatások máris térzékelhetők (pl. Seager et al., 2018).

Az IPCC elismeri a regionális klímamodell-eredmények pontossági korlátait. Ez a példa azt mutatja, hogy a felhasználóknak a modell-előrejelzéseket esetleg kell gondosan értékelniük, mivel a helyi torzítások elég nagyok lehetnek ahhoz, hogy a modellek egyszerűen nem felelnek meg a célnak. Ahogy azt a modellező közösség két vezetője nemrégiben megjegyezte (kiemelés tőlem)

... úgy véljük, hogy számos olyan kulcsfontosságú alkalmazás esetében, amely regionális klímamodell-kimenetet igényel, vagy a kis léptékű folyamatokból adódó nagyléptékű változások megítélésében a modellek jelenlegi generációja e célnak nem felel meg. (Palmer és Stevens 2019)

Összefoglalva:

- A klímamodellek az elmúlt néhány évtized számos reprodukálási vonatkozásában felmelegedési torzításokat mutatnak.

- Túl nagy felmelegedést mutatnak a felszínen (kivéve a legalacsonyabb ECS-értékű modelleket), túl nagy felmelegedést az alsó és középső troposzférában, valamint túl nagy felerősödést a magasban
- Túl nagy sztratoszférikus lehűlést, túl sok hőveszteséget és túl nagy felmelegedést mutatnak az Egyesült Államok kukoricaövezetében.
- Az egyes klímamodellek féltekei albedókülönbsége a megfigyelésekhez képest az előjelet és a nagyságrendet illetően is széles skálán mozog. A W/m^2 -ben kifejezett tartomány háromszor nagyobb a CO_2 által jelentett közvetlen antropogén kényszernek.
- Az IPCC elismert néhány efféle problémát, de nem mindegyiket.

Hivatkozások

- Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate sensitivity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53, 511-518.
<https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z>
- Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. *Journal of Hydrometeorology* 23, 1845-1860.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1>
- Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, et al. (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations. *Geosciences* 9, 135.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9030135>
- Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. *AGU Advances* 2, e2021AV000440.
<https://doi.org/10.1029/2021AV000440>
- Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf
- Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 114(D21).
<https://doi.org/10.1029/2009JD011841>
- McKittrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. *Earth and Space Science* 7. <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), “Data and Code for DoE Report 2025”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24390–24395.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, et al. (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 123.
<https://doi.org/10.1029/2018JD028901>
- Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 50, e2022GL101802.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

- Santer B D, P.W. Thorne, L Haimberger et al. (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere *International Journal of Climatology* 28 1703–22 <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756>
- Santer, B.D. S. Po-Chedley, L. Zhao, C et al. (2023) Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 120 (20) e2300758120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120>
- Scaffeta, N (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics* 60, 3091–3120 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Seager, R., J. Feldman, N. Lis, et al. (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America’s arid–humid divide. Part II: The meridian moves east. *Earth Interactions* 22. <https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1>
- Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. *Environment Backgrounder*, The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models>
- Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster et al. (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
- Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: *Journal of Time Series Analysis* 38. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12209>

6 SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

Fejezet-összefoglaló

A rendelkezésre álló történelmi adatokhoz képest a szélsőséges időjárási legtöbb megnyilvánulása nem mutat statisztikailag szignifikáns, hosszú távú tendenciát. Bár az 1950-es évek óta az Egyesült Államokban több lett a forró napok száma (amint azt az AR6 hangsúlyozza), e szám az 1920-as és 1930-as évekre jellemzőkhöz képest még mindig alacsony. A konvektív (függőleges légáramlással járó) szélsőséges viharok, hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok jelentős természetes változékonyságot mutatnak, de hosszú távú növekedés az észlelések szerint nincsen. Egyes régiókban rövid időközönként kimutatható a szélsőséges csapadékesemények számának növekedése, de tartós és regionális trend nem alakul ki. A tűzvészek nem gyakoribbak az Egyesült Államokban, mint az 1980-as években voltak. A leégett terület nagysága az 1960-as évektől a 2000-es évek elejéig nőtt, azonban a becsült természetes alapszinthez képest még mindig kicsiny. Az Egyesült Államokbeli tűzvész-tevékenység erősen függ az erdőgazdálkodás gyakorlatától.

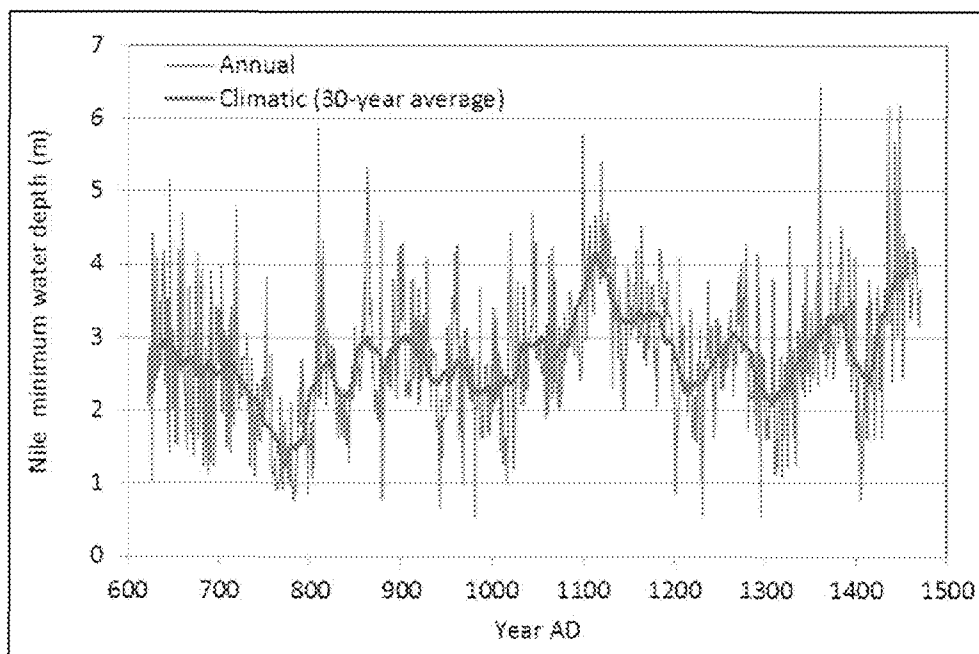
6.1 Bevezetés

A nagy hatású időjárási szélsőségek, amelyek általában a hőmérséklettel, a csapadékkal és/vagy az erős széllel kapcsolatosak, megzavarhatják az infrastruktúrát, és ezáltal veszélyeztethetik az emberi egészséget és a jólétet. A kérdés nem az, hogy bekövetkeznek-e szélsőségek. Inkább az, hogy vannak-e a szélsőségek gyakoriságában vagy jellegében hosszú távú (évtizedes léptékű) változások („észlelés”), valamint az, hogy milyen mértékben okozza ezeket a változásokat és a veszélyekben bekövetkező változásokat az antropogén üvegházgáz-kibocsátás („attribúció”; pl. AR6 Seneviratne et al. 2021).

Annak az állítására, hogy a felmelegedés súlyosbítja a szélsőséges időjárási eseményeket, az ún. folyamat alapú megértésre és egyszerű termodinamikai érvekre hivatkoztak. Naivitás azonban azt feltételezni, hogy a közelmúltbeli szélsőséges események bármelyikét az éghajlatra gyakorolt emberi hatás okozta volna. Az éghajlat az időjárás évtizedek alatti statisztikai tulajdonságairól szól, nem pedig egyszeri eseményekről. Továbbá statisztikai elemzésre csak körülbelül 130 évnyi megbízható megfigyelési adat áll rendelkezésre. Ez a rövid időszak még nem tartalmazza az összes szélsőséges eseményt, amelyet az éghajlati rendszer önmagában képes létrehozni. A geológiai idők során az éghajlati rendszer (lényegében) végtelen sokféle időjárási mintázatot és szélsőséget generált, és mivel ezekről nem történt ember általi megfigyelés, így hiányoznak az extrém statisztikák meghatározásához használt adatbázisokból [lásd alább: *A rövid adatrekordok veszélyei*]. Emiatt egy eddig példa nélküli szélsőséges esemény hozzárendelése feltételezéseket igényel a természetes változások nagyságrendjére vonatkozólag.

Ez a fejezet az extrém időjárás trendjeinek észlelésével foglalkozik, míg a 8. fejezet az ok-okozati hozzárendelést vizsgálja, a 8.4. szakasz pedig kifejezetten a szélsőséges időjárással foglalkozik. Ha nem észlelünk trendet, akkor egyértelműen nincs alapja a hozzárendelésnek. De még ha meg is figyelhető egy trend, nem feltétlenül következik, hogy azt az ember által okozott felmelegedésnek tulajdonítható.

Különösen igaz ez a csapadékeseményekre. A hidrológiai szakirodalomban régóta tudott, hogy a csapadékadatokban hosszú ideig tartó, lassú és szabálytalan oszcillációk vannak jelen (Hurst 1951, Cohn és Lins 2005, Markonis és Koutsoyiannis 2016). A változékonyság pontos becsléséhez az efféle természetes mintázati jellemzőik hosszú megfigyelést igényelnek. A természetes változékonyság időmértékéhez képest rövid feljegyzések elemzése hajlamossá tesz a trendek félreértelmezésére, túlbecsülve a ma megmutatkozó trendek jelentőségét és alábecsülve a szélsőséges események valószínűségét (Cohn és Lins 2005)



6.1.1. ábra: A Nílus folyó éves minimummélysége Kairó közelében több mint 650 éven keresztül, Kr. u. 622-től 1284-ig. A méterben mért adatok a hosszabb távú trendek körüli évenkénti ingadozások jellegzetes mintázatát mutatják. Koutsoyiannis (2013) adatai

Jó példa erre a Nílus folyó éves minimummagasságának nyolc évszázados feljegyzése, amelyet Kairó Roda-szigetén figyeltek meg, és amely a 6.1.1. ábrán látható. A Nílus folyót egy 4 millió négyzetmérföldes vízgyűjtő medencében hulló csapadék táplálja, ami a CONUS körülbelül egyharmadának felel meg. Mivel az emberi hatás a globális éghajlatra jóval a 20. század előtt biztosan elhanyagolható volt, a harmincéves átlag évszázados léptékű változékonysága teljesen természetes eredetű; a hetedik és nyolcadik századi egyiptomiak tévesen feltételezték volna, hogy az akkoriban súlyosbodó aszály lenne az „új normális”.

Ezeket a fenntartásokat szem előtt tartva vizsgáljuk meg a kiválasztott időjárási és éghajlati szélsőségek változására vonatkozó bizonyítékokat. Visszatérő téma a közvélemény és a tudományos bizonyítékok közötti széles szakadék. A médiatudósításokban, a kormányzati és a magánszektorbeli tárgyalásokon, sőt egyes tudományos szakirodalomban is rutinná váltak az általánosító kijelentések, miszerint mindenféle szélsőséges időjárás az üvegházhatású gázok és a „klímaváltozás” miatt súlyosbodik. A szakértői értékelések azonban jellemzően nem vonnak le ilyen átfogó következtetéseket, ehelyett a konkrét trendek beazonosításában, valamint az antropogén kényszerrel való ok-okozati összefüggés megállapításában rejlő nehézségeket hangsúlyozzák.

A következő fejezetekben részleteket közlünk különféle IPCC és NCA értékelő jelentésekből, a forrásokat a következőképpen jelölve:

SREX: Az IPCC különjelentése a szélsőséges események és katasztrófák kockázatkezeléséről az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás előmozdítása érdekében (2012)

AR6: Az IPCC hatodik értékelő jelentése, I. munkacsoport (2021).

NCA4: Az Egyesült Államok klímatudományi különjelentése a negyedik nemzeti éghajlati értékelésről (2017), I. kötet.

NCA5: Ötödik nemzeti éghajlati értékelés (2023).

A részletekben a dőlt betűs rész az eredetiből való, a félkövér kiemelés tőlünk származik. Ezenkívül, ahol lehetséges, a 2024-ig terjedő időszakra vonatkozó információk megadásához standard kormányzati forrásokat használunk.

6.2 Hurrikánok és trópusi ciklonok

Az AR6 a következő értékelést nyújtja a trópusi ciklonokról (TC; itt a hurrikánok szinonimájaként használjuk):

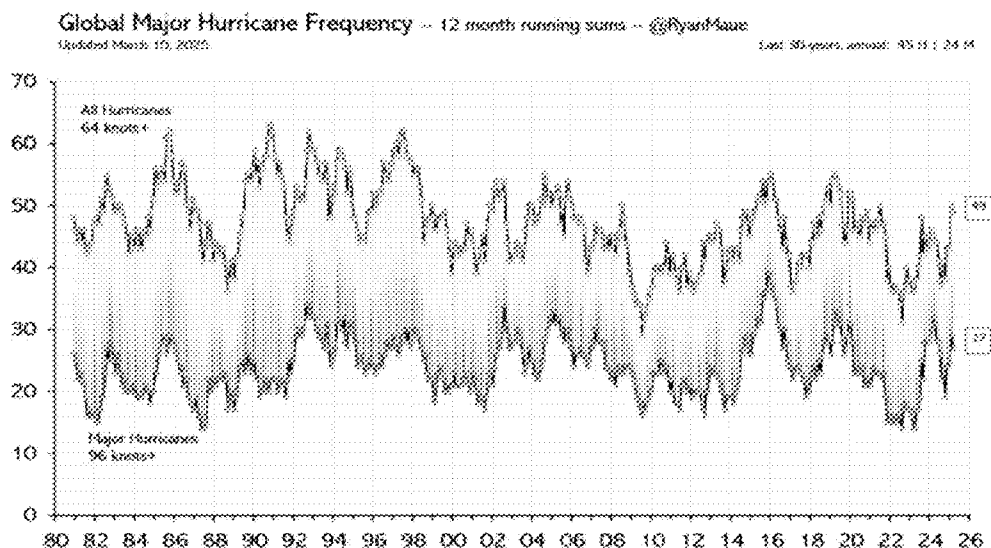
AR6: A legtöbb jelentett hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trend TC gyakoriságát vagy intenzitásalapú mérőszámát illetően *alacsony megbízhatóságú*, ugyanis a legjobb nyomon követési adatok gyűjtésére használt technológia megváltozott. (IPCC, 2021. 1585. o.)

AR6: *Valószínű*, hogy a nagyobb (3–5. kategóriájú) trópusi ciklonok előfordulásának globális aránya az elmúlt négy évtizedben nőtt... *Alacsony a megbízhatósága* a hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trendeknek az összes kategóriájú trópusi ciklonok gyakoriságát illetően (IPCC, 2023. SPM. 9. o.)

AR6: A legjobb nyomon követési adatok egy részhalmaza, amely az Egyesült Államokat 1900 óta közvetlenül érintő hurrikánoknak felel meg, megbízhatónak tekinthető, és **az amerikai partot elérő események gyakoriságában nem mutatkozik trend.** (IPCC 2021, 1585. o.)

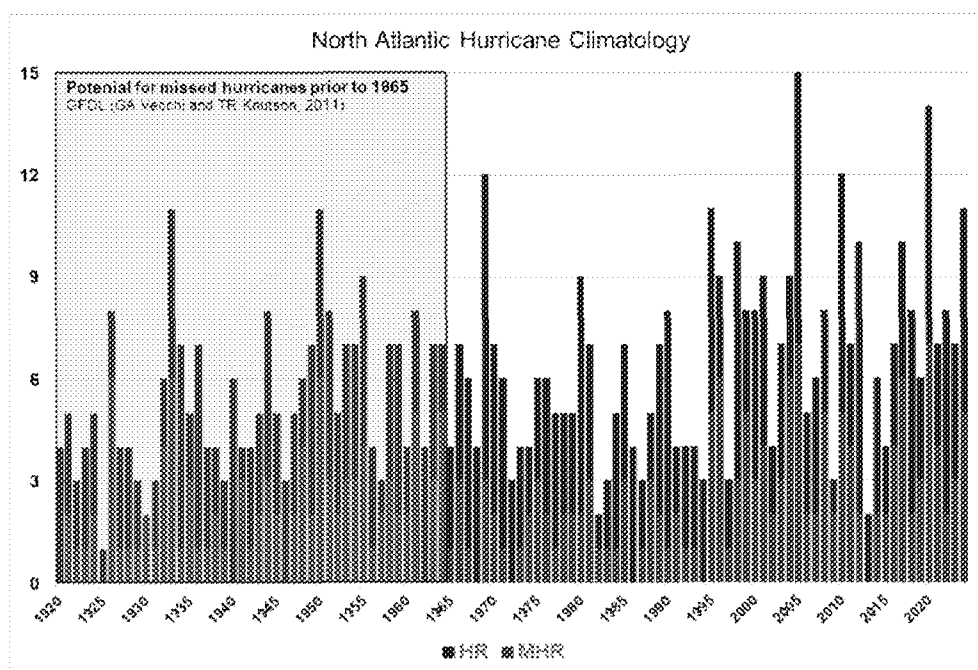
1980 óta, amióta a műholdas megfigyelések teljes mértékben lefedik a globális óceánokat, bizalommal elfogadhatjuk a globális hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) teljes számaravonatközó adatokat. A 6.2.1. ábra azt mutatja, hogy átlagosan évente körülbelül 50 hurrikán fordul elő, amelyek közül körülbelül 25 éri el a nagyobb hurrikán státuszt (Maue, 2025). Jelentős éves és évtizedes változékonyság figyelhető meg, a hurrikánok számában enyhe csökkenés, a nagyobb hurrikánok számában pedig enyhe, de jelentéktelen növekedés tapasztalható. Ez a két trend együttesen összességében a nagyobb hurrikánok arányának növekedését eredményezi.

A globális hurrikánstatisztikát a Csendes-óceán északnyugati része uralja, amely a teljes globális hurrikánszám ~35 százalékát teszi ki, míg az Atlanti-óceán a globális hurrikánok ~15 százalékát adja (Colorado Állami Egyetem, 2025). Az Atlanti-medencére vonatkozó adatok messzebbre nyúlnak vissza, mint a többi óceánmedencére vonatkozó adatok, és az amerikai politikai döntéshozók számára ezek a legrelevánsabbak.



6.2.1. ábra: A hurrikánok és a nagyobb hurrikánok globális gyakorisága 1980 óta. Forrás: Frissítve Maue 2011 alapján.

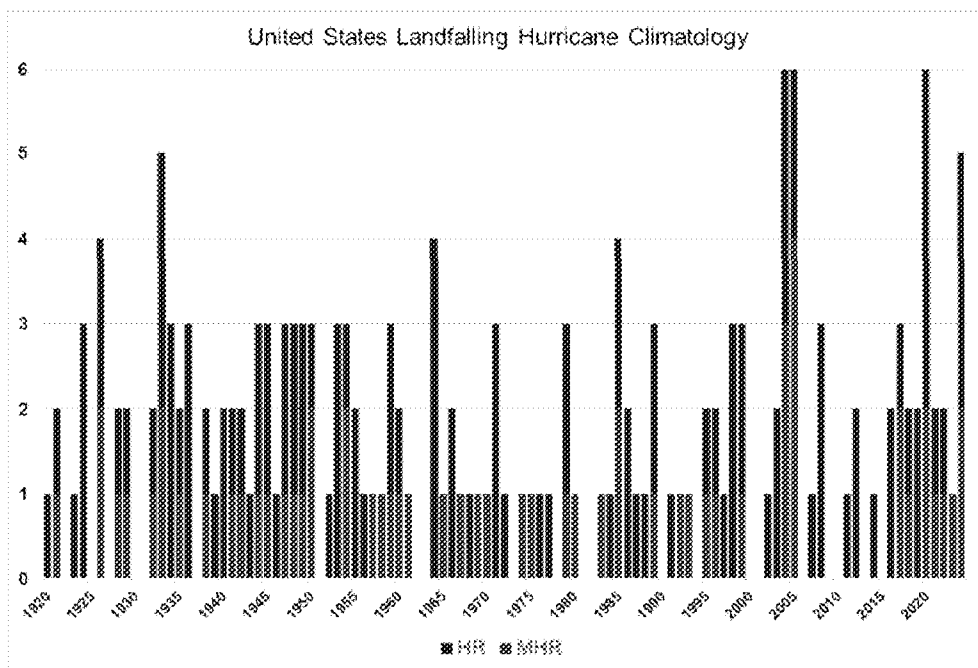
A 6.2.2. ábra az atlanti hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) gyakoriságát mutatja 1920-ig visszamenőleg. Az 1965 előtti adatok (a műholdas megfigyelések kezdete az Atlanti-óceánon, kékkel árnyékolva) némi alulszámlálásról tanúskodnak, az 1920 előtti adatok pedig jelentős alulszámlálást mutatnak (Vecchi és Knutson, 2011). Az atlanti hurrikánaktivitás minden mérése 1970 óta. jelentős növekedést mutat Az 1971 és 1994 közötti időszakban azonban kivételesen alacsony aktivitás volt megfigyelhető, míg magas aktivitás (az elmúlt két évtizedhez képest, még alulszámlálással is) megfigyelhető volt az 1950-es és 1960-as években, sőt az 1930-as években is.



6.2.2. ábra: Hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) atlanti gyakorisága 1920 óta. Forrás: National Hurricane Center (2024)

A 6.2.2. ábra azt mutatja, hogy az atlanti hurrikánok évtizedes és több évtizedes időléptékekben erősen változnak. E változások elsősorban az Atlanti Többévtizedes Oszillációhoz (AMO) kapcsolódnak, amely a medence egészére kiterjedő tengerfelszín-hőmérséklet és tengerszint nyomásingadozásokban nyilvánul meg, amelyek nagyléptékű óceáni cirkulációs mintázatokhoz kapcsolódnak. Az AMO 1926-1970 között és 1995-től mostanáig meleg fázisú, de 1971-1994 között hűvös fázisú volt. Ez van a legnagyobb hatással van a nagyobb hurrikánok (3+ kategória) számára, amelyeket Goldenberg et al. (2001) a normálnál nagyobb SST-kkel és a csökkent függőleges nyírással társítottak az AMO meleg fázisában (lásd még: Bell és Chelliah, 2006; Klotzbach et al., 2018).

Klotzbach et al. (2018) átfogó értékelést végzett az Egyesült Államok kontinentális részén 1900 óta partot ért hurrikánok adatairól. A 6.2.3. ábra 2024-ig frissíti elemzésüket. Míg a partra jutó hurrikánok legnagyobb száma 2004-ből, 2005-ből és 2020-ból származik, 1920 óta nincs statisztikailag szignifikáns tendencia. A 6.2.3. ábra a nagyobb hurrikánok partrasérésének idősorait is mutatja (3-5. kategória). A feljegyzések szerint a legintenzívebb év 2005 volt (4 nagyobb hurrikán jutott partra). 2005 után azonban 2016-ig nem volt nagyobb hurrikán az Egyesült Államokban, ami a leghosszabb ilyen időszak 1920 óta.



6.2.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) partrajutási gyakorisága 1920 óta. Forrás: NOAA HRD(a) (2024)

A 6.2.3. ábra az Egyesült Államokbeli partrajutási aktivitás jelentős évközi és több évtizedes változékonyságát mutatja. Klotzbach et al. (2018) megvizsgálta, hogyan változnak a partrajutások számai az ENSO (El Niño vs. La Niña) és az Atlanti-óceáni Többévtizedes Oszcilláció (AMO) meleg és hideg fázisai szerint.

Villarini et al. (2012) az Egyesült Államokbeli hurrikánok partrajutásának elemzését nyújtja 1878-ig visszamenőleg. Bár lehetséges, hogy a 19. század végén néhány partrajutás kimaradt a Mexikói-öböl partvidékének ritkán lakott területei miatt, figyelemre méltó, hogy a teljes feljegyzésben a legintenzívebb év 1886, 7 hurrikán partra jutásával, amkkor még az éghajlatra kifejtett emberi hatások sokkal kisebbek voltak, mint manapság.

A 6.2.1. táblázat a 10 legerősebb hurrikánt (és a holtversenyeket) mutatja, amelyek az Egyesült Államok partját érték. Azok közül a hurrikánok közül, amelyek tartósan 240 km/h-nál nagyobb széllel érték partot, a 21. században csak egy fordult elő.

Összefoglalva, a hurrikánaktivitás globális és regionális változékonyságának, valamint trendjeinek elemzése alapot nyújt a változások észleléséhez és okok megértéséhez. A hurrikánaktivitás viszonylag rövid történelmi feljegyzése, és a még rövidebb műholdas korszakból származó feljegyzés nem elegendő annak megállapításához, hogy a közelmúltbeli hurrikánaktivitás szokatlan-e a háttér természetes változékonyságához képest. Az atlanti hurrikánfolyamatokat jelentősen befolyásolják az Atlanti-óceán óceáni cirkulációjának természetes módozatai, nevezetesen az Atlanti-óceán Többévtizedes oszcillációja (AMO). Bár régóta feltételezik, hogy a globális tengerfelszín-hőmérséklet emelkedése a hurrikánok intenzitásának növekedését okozza, a hurrikánadatokban bármilyen jelentős trend azonosítását akadályozza a rövid adathalmaz és a jelentős természetes változékonyság.

A folyamat alapú megértés azt is sugallja, hogy a hurrikánokból származó viharhullámoknak és csapadékmennyiségnek a melegebb hőmérséklettel növekednie kellene. Azonban a változó partszakaszokra érkező hurrikánok viszonylag kis száma és az egyes viharokhoz kapcsolódó összetett dinamika kizárja a változások érdemi kimutatását.

Rank	Year	Landfall Wind (MPH)	Name
1	1935	185	"Labor Day"
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	"Last Island"
5	1886	150	"Indianola"
5	1919	150	-----
5	1932	150	"Freeport"
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

6.2.1 táblázat: Az USA partjai mentén szárazföldre kijutó legerősebb hurrikánok. Forrás: (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Hőmérsékleti szélsőségek

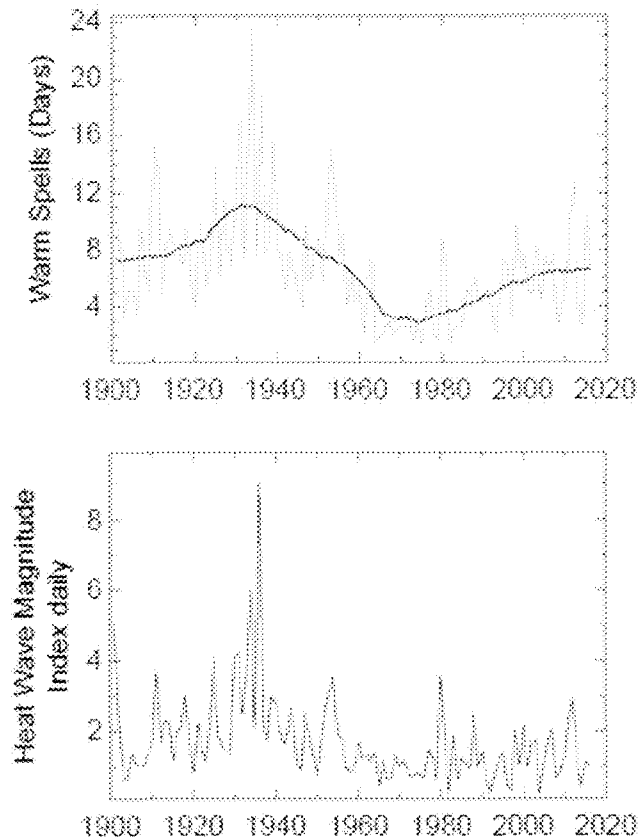
Az AR6 értékelés az 1950 utáni időszakra összpontosított, és a hőhullámok gyakoriságának és intenzitásának növekvő tendenciáiról számolt be. Az NCA4 azonban megjegyezte, hogy az Egyesült Államokban a hőhullám-aktivitás az 1930-as években érte el csúcspontját (6.3.1. ábra).

AR6: *Gyakorlatilag biztos*, hogy a meleg szélsőségek (beleértve a hőhullámokat is) az 1950-es évek óta gyakoribbak és intenzívebbek lettek a legtöbb szárazföldi régióban, míg a hideg szélsőségek (beleértve a hideghullámokat is) ritkábbak és kevésbé súlyosak lettek (SPM, A3.1)

AR6: Észak-Amerikában nagyon erős bizonyítékok vannak a meleg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának *nagyon valószínű* növekedésére, valamint a hideg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának csökkenésére az egész kontinensen, bár a trendekben jelentős térfélt és szezonális eltérések vannak. A minimumhőmérsékletek a kontinensen következtetes melegedést mutatnak, míg az USA egyes részein a napi hőmérsékletek éves maximum értékében ellentétebb trendek figyelhetők meg. (11. fejezet, 1550. o.)

NCA4: A meleg szélsőségek változásai árnyaltabbak, mint a hideg szélsőségeké. Például az elmúlt évszázadban az év legmelegebb napi hőmérséklete a Nyugat egyes részein **emelkedett**, de a Sziklás-hegységtől keletre szinte minden helyen **csökkenés volt** megfigyelhető. Valójában minden keleti régió nettó **csökkenést tapasztalt**, leginkább a Középnnyugaton (kb. 1,2°C) és a Délkeleten (körülbelül 0,8°C). (190-191. o.)

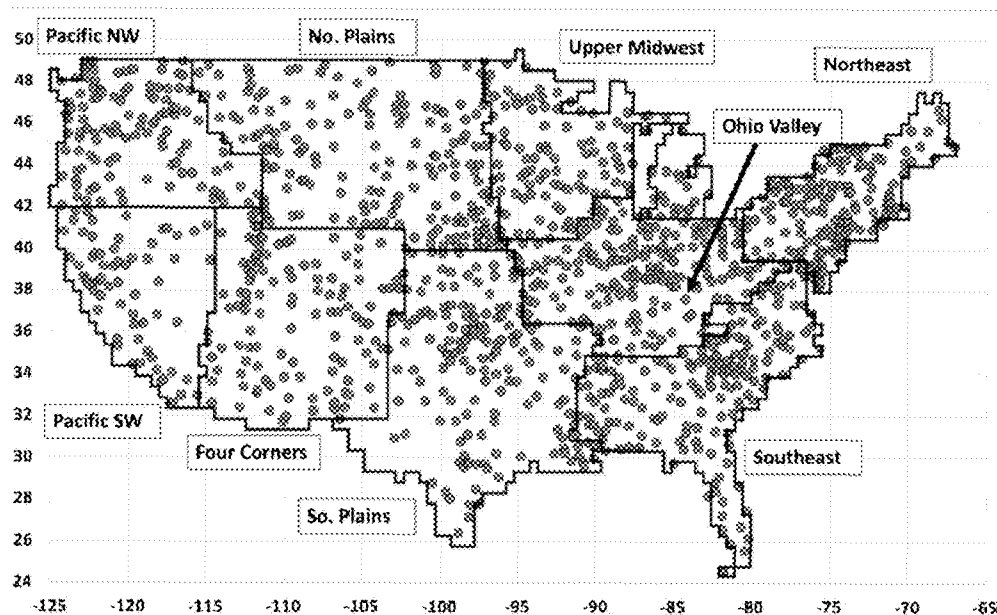
NCA4: Az 1960-as évek közepe óta az év legmelegebb napi hőmérséklete csak nagyon kis mértékben emelkedett (nagy éves eltérések közepette). A hőhullámok (6 napos időszakok, amelyekben a maximális hőmérséklet a 90. percentilis felett volt 1961–1990 között) gyakorisága az 1930-as évek közepéig nőtt, az 1960-as évek közepére jelentősen ritkábbá váltak, majd ezt követően ismét növekedett a gyakoriságuk. A meleg napi hőmérsékletekhez hasonlóan a **hőhullámok nagysága is az 1930-as években érte el a maximumát. (190-191. o.)**



6.3.1. ábra: Hőhullámok az Egyesült Államokban 1900 óta. Forrás: NCA4 6.4. ábra

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

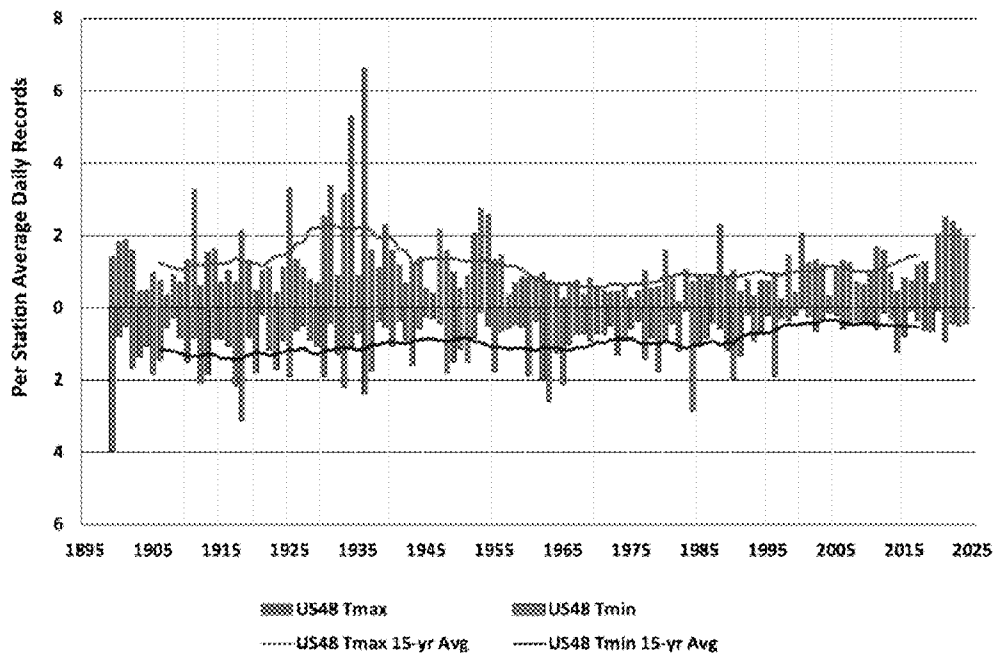
A meleg évszak napi maximumhőmérsékletei (T_{max} , május-szeptember) és a hideg évszak napi minimumhőmérsékletei (T_{min} , december-március) 1898 decemberétől (126 év) kezdődően állnak rendelkezésre. Az adatkészlet 1211 CONUS állomásból áll, amelyeket az Egyesült Államok Történelmi Éghajlati Hálózatának vagy USHCN állomásoknak neveztek el (lásd 6.3.2. ábra; Quinlan et al. 1987, Karl et al. 1990). Ezeket az állomásokat a NOAA választotta ki, mivel a legkevésbé problémásak az adatkimaradások, az állomásáthelyezések és a műszercserék tekintetében. Ahol még mindig hiányosságok vannak, a közeli állomásokat összevonták (a torzítást korrigálva), így az állomások esetében elérhető medián adatmennyiség 98%. Bár az adatkészletben vannak hibák, beleértve a az UHI hatások által okozott, feldolgozatlan hamis felmelegedést is, és amelyek a T_{min} megfigyelését különösen torzítják, ez az adatkészlet a T_{max} hőszélsőségek trendjeinek felméréséhez kellően pontos.



6.3.2. ábra: Az USHCN hőmérsékleti állomásainak helyszínei. Forrás: USHCN.

Azzal a kérdéssel kezdjük, hogy vajon változott-e a napi rekordmagas vagy alacsony hőmérsékletek előfordulása 1898 decembere óta. Minden meleg évszak 153 napból áll (május 1. és szeptember 30. között), és minden hideg évszak 122 napból (december 1. és március 31. között). Minden állomásra és napra kiszámítottuk azt az évet, amelyben a rekordmagas (legalacsonyabb) hőmérséklet előfordult. 126 évnél megfigyelés alapján, ha nem lennének hőmérsékleti trendek az idő múlásával, a Tmax várható rekordszáma állomásonként és évente 1,21 ($=153/126$), a Tmin esetében pedig állomásonként és évente 0,96 ($=122/126$) lenne.

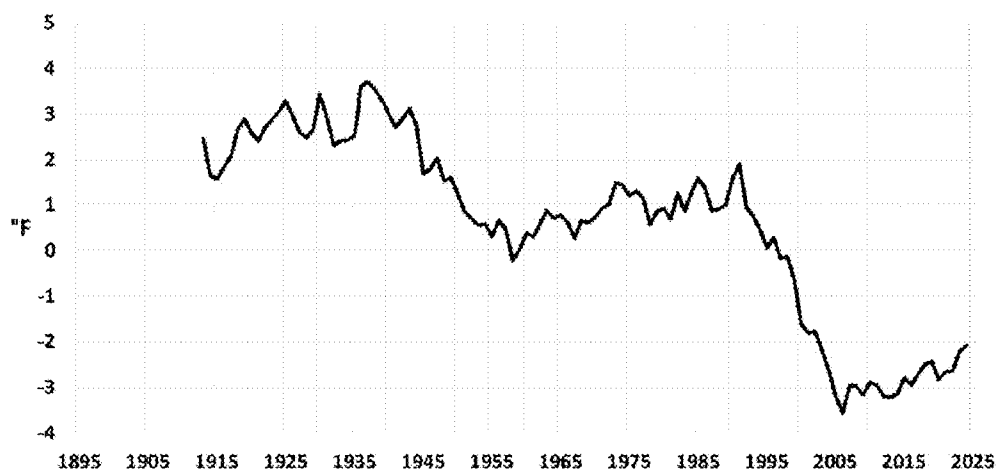
A 6.3.3. ábra ezen extrém események előfordulásának időbeli eloszlását mutatja. A CONUS meleg évszakai szélsőségeinek számos mérőszámában van egy közös vonás - az 1920-as és különösen az 1930-as évek kivételes hősége, amely 1936-ban tetőzött. Állomásonkénti átlagban a Tmax rekordok 60 százaléka és a Tmin rekordok 59 százaléka az időszak első felében (1899-1961 között) történt.



6.3.3. ábra: A napi rekordok száma a meleg és hideg évszakokban a CONUS-ban. A vonalak a 15 éves, közép-re igazított átlagot jelölik. Forrás: 1211 USHCN állomás, a megfigyelések legalább 92 százalékának eléréséhez az 1898 decembere óta eltelt 126 éves időszakban szükség szerint kiegészítve. US48: összefüggő amerikai államok. Tmax: maximum hőmérséklet. Tmin: minimum hőmérséklet.

A hideg oldalon a CONUS által tapasztalt legkiterjedtebb hideg szélsőség az 1899 februárjában, Bálint-napon bekövetkezett sarkvidéki betörés volt. A második helyen az 1917-es betörés áll. A hidegrekordok gyakorisága csökkent, különösen az időszak utolsó negyedében, amikor a szélsőséges hidegeseményeknek csak 13 százalékát mérték. Ezzel szemben az utolsó negyedben a szélsőséges Tmax rekordok 25 százalékot érték el, a statisztikai várakozásoknak megfelelően. Ezeket az általános jellemzőket a korábbi értékelések is kimutatták (lásd fent, IPCC AR6, NCA4). A két előzmény kombinálásával a hideg és meleg szélsőségek számának összességében bekövetkezett csökkenése az elmúlt évszázadban egy olyan éghajlatra utal, amely kevésbé hajlamos a szélsőségekre.

Ez a mintázat látható a 6.3.4. ábrán is. Az összes állomásra és mindegyik évre kiszámították a legmelegebb meleg évszak és a leghidegebb hideg évszak hőmérsékleteit. Ezután állomásonként kiszámították a különbségeket, és földrajzilag átlagolták az összes állomáson, így megkapták az egyes évekre vonatkozó helyi szélsőséges hőmérsékletek várható tartományának éves mértékét. A 6.3.4. ábra ennek a mutatónak a 15 éves utolsó átlagát mutatja, ami az elmúlt évszázadban egyértelműen csökkent.



6.3.4. ábra: Az egyes állomások legmelegebb meleg évszaki Tmax és leghidegebb hideg évszaki Tmin értékei közötti különbség 15 éves, a hosszú távú átlaghoz viszonyított különbségének átlaga. Forrás: Szerzői elemzés az USHCN adatai alapján.

Az egyes állomások legmelegebb nyári Tmax és leghidegebb téli Tmin értékei közötti átlagos különbség az elmúlt 126 évben körülbelül 5°F-kal csökkent. A csökkenés főként a melegebb téli Tmin értéknek köszönhető, de a nyári Tmax csökkenése is szerepet játszik. A Tmin emelkedése szorosan összefügg a meteorológiai állomások körüli mesterséges felületek növekvő jelenlétével az elmúlt több mint 100 évben (az úgynevezett városi hősziget-hatás; 3.3. szakasz, Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, valamint Spencer et al. 2025).

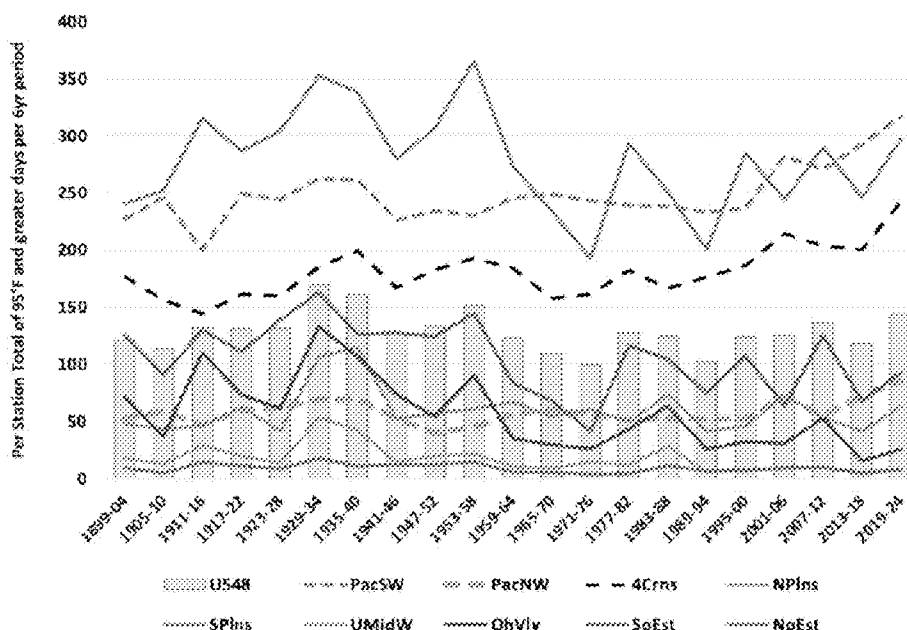
Összefoglalva, míg az Egyesült Államokban rendszeresen tapasztalhatók szélsőséges hőmérsékleti események, és nagy médiafigyelmet kapnak, a hosszú távú feljegyzések azt mutatják, hogy az Egyesült Államok éghajlata az idő múlásával kevésbé szélsőséges (enyhébbé) vált, ha a meleg évszak maximumai és a hideg évszak minimumai közötti tartományt mérjük.

6.3.2 Hőküszöb-túllépések

„A szélsőséges hőmérsékleti események kockázata változik” címszó alatt a legfrissebb amerikai nemzeti éghajlat-értékelő jelentés (NCA5) megjegyzi a 95°F-os vagy annál magasabb napok számának küszöbértékének növekedését, kijelentve:

Az Egyesült Államok nyugati részét az 1980-as évek óta különösen sújtja a szélsőséges hőség..., a 95°F feletti napok számának nagyobb növekedését tapasztalva, ami várható is volt a régióban a keleti USA-hoz képest nagyobb mértékű felmelegedés miatt. 2018 óta számos jelentős hőhullám sújtotta az Egyesült Államokat, köztük egy rekordot döntő esemény a Csendes-óceán északnyugati részén, 2021-ben.

Változik-e a 95°F-os napok előfordulása? Egy olyan változatos éghajlaton, mint a CONUS, a küszöbérték statisztikák félrevezetőek lehetnek. Egy olyan régióban, ahol sok állomás nyáron 95°F-hoz közeli Tmax átlaghőmérséklettel rendelkezik, a metrikában nagy ingadozások tapasztalhatók, amennyiben csak kis változások történnek az átlaghőmérsékletben. Másutt, ahol az állomások ritkán érik el, vagy gyakorlatilag mindig elérik a 95°F Tmax hőmérsékletet, egy kis változásnak nincs nagy hatása az eredményekre.



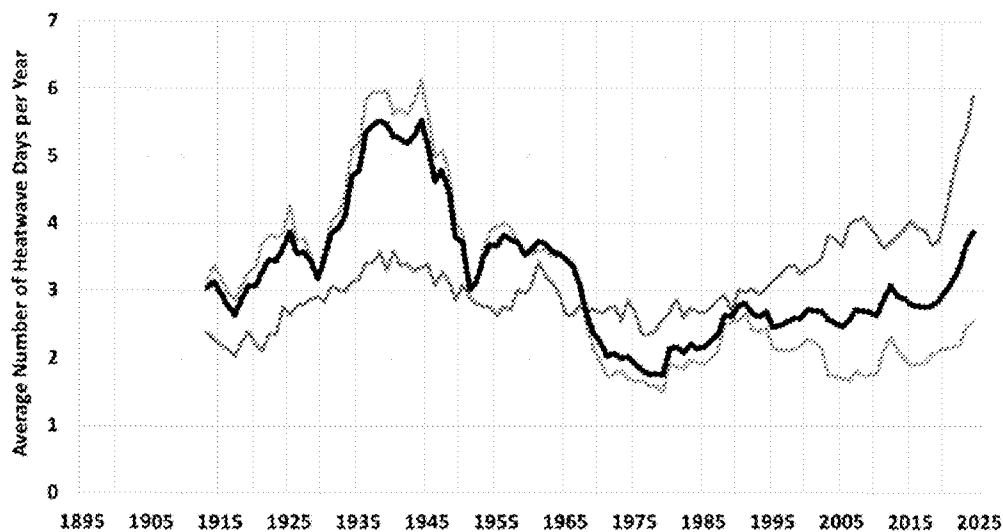
6.3.5. ábra: $\geq 95^{\circ}\text{F}$ napok száma 6 éves időszakokban, USA 48 (oszlopok) és régiók (vonalak). 6 éves időszakot használunk, mivel ez egyenletesen osztja el a 126 éves rekordot. Az eredmények robusztusak a 2 és 11 nap közötti időszakok használatára. USA 48: összefüggő amerikai államok. A régióneveket lásd a 6.3.2. ábrán. Forrás: Az USHCN adatainak szerzői elemzése.

Az elmúlt 126 évben az átlagos CONUS állomás 6 éves időszakonként 129 olyan napot tapasztalt, amikor a hőmérséklet meghaladta a 95°C -ot, de a regionális értékek 278-tól (Déli-síkság) 9-ig (Északkelet) terjednek. Ezért az ilyen küszöbérték-elemzéseket óvatosan kell értelmezni. A 6.3.5. ábra azt mutatja, hogy a kilenc régió közül csak háromban (mind a nyugati oldalon) tapasztaltak növekvő tendenciát a 95°F -os vagy annál melegebb napok számában (szaggatott vonalak). A CONUS egészében nem, a másik hat régióban pedig csökkenés tapasztalható.

Az NCA5 idézetben említett 2021-es csendes-óceáni északnyugati hőhullámot a 8.6.1. szakaszban részletesebben is megvizsgáljuk. A bizonyítékok arra utalnak, hogy ez egyetlen, példa nélküli esemény volt a feljegyzésekben, és nem része a fokozódó szélsőséges hőség mintázatának. Például az 5 napos átlagos troposzférikus rácspont-hőmérsékleti anomália a csendes-óceáni északnyugati régióban az esemény során $+10,8^{\circ}\text{C}$ volt, ami az északi féltéke legszélsőségebb rácspont-nyári anomáliája az elmúlt 46 évben, több mint 4 millió rácspont alapján. Ezzel szemben a globális hőmérsékleti anomália ebben az időszakban gyakorlatilag nulla volt ($+0,03^{\circ}\text{C}$, Mass et al. 2024).

6.3.3 Hőhullámok

A hőhullámoknak (egymást követő napoknak, amelyek meghaladják az extrém küszöbértéket) nagyobb társadalmi hatásuk van, mint egyetlen napi rekordhőmérsékletnek. A „hőhullám napokat” itt úgy mérjük, mint az összes olyan nap számát május-szeptemberben, amelyek meghaladják az adott nap 90. percentiliséét, és amelyek legalább hat egymást követő napos időszakon belül esnek. Ez egyenértékű az NCA4-ben használt módszerrel, azzal a különbséggel, hogy a referencia-időszak itt a teljes 1899-2024 közötti időszak, míg az NCA4 a referencia-időszakot a hűvösebb 1961-1990 közötti időszakra csonkolta. (Az alább látható eredmények mintázata nem függ a referencia-időszak megválasztásától.) Ez a csonkolás növeli a pozitív eredményeket (a 90. percentilist meghaladó napok) a referencia-időszakra, különösen 1960-tól kezdődően és a jelenig terjedően (lásd a 6.3.6. ábrát és az alábbi tárgyalást).

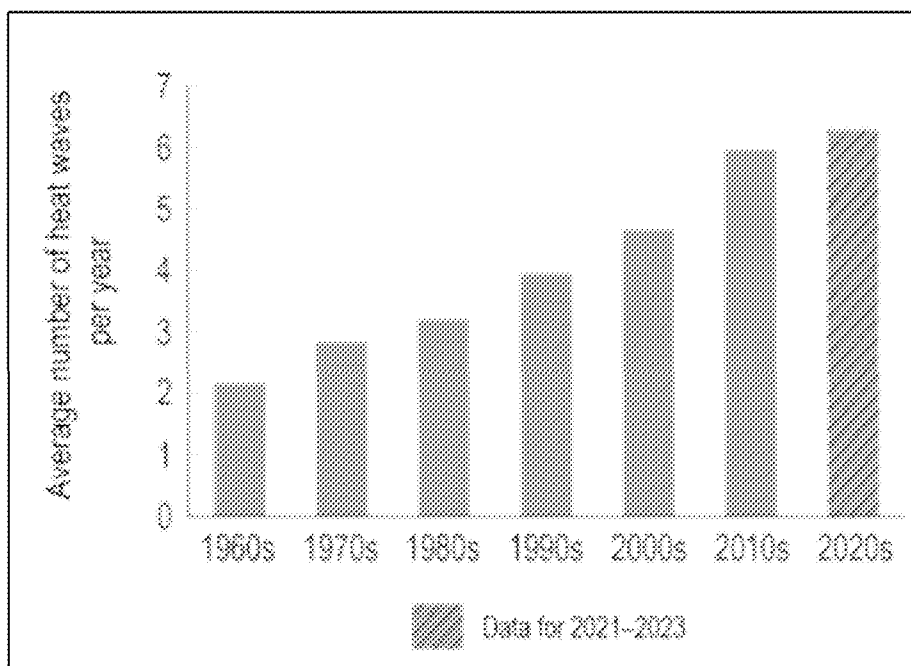


6.3.6. ábra: A hőhullámos napok számának 15 éves átlaga állomásonként a CONUS-ban (fekete vonal) és két régióban: Nyugat (piros), Közép-Kelet (zöld).

A 6.3.6. ábra azt jelzi, hogy a hőhullám-aktivitásban regionális eltérések vannak. A 20. század első felének túlzott hősege elsősorban az ország keleti kétharmadában jelentkezett, míg a közelmúltban a hőhullámos napok számának növekedése Nyugaton tapasztalható (NCA5). Ez azt jelzi, hogy a háttér meleg évszaki cirkulációja a 20. század első felében a keleti országrészekben kedvezett a hőhullámoknak, de a 21. században a mintázatok a nyugati részekben kedveztek a hőhullámoknak. A CONUS egészére nézve a hőhullámok ma sem gyakoribbak, mint egy évszázaddal ezelőtt, ami összhangban van az NCA4-ből vett 6.4.1. ábra felső paneljével.

Ez a mutató régióként jelentősen eltérő. A négy északi régió (Csendes-óceáni ÉNY, Északi-síkság, Felső-Középnnyugat és Északkelet) átlagosan 15-27 hőhullámos napot tapasztal 15 éves időszakonként. Ezzel szemben az öt déli régió (Csendes-óceáni Délnyugat, 4-Corners, Déli-síkság, Ohio-völgy és Délkelet) 37-54 ilyen napot tapasztal, ami lényegében kétszer annyi. Ez arra utal, hogy a nyári cirkulációs mintázat a déli régiókban hajlamosabb az állandó eseményekre, míg az északi régiókban az átmeneti rendszerek gyakoribbak, és így lerövidítik ezeket a potenciálisan hosszabb eseményeket.

A hőhullámok elemzése jó példa arra, hogy miért fontos a teljes adatkészletek és a megfelelő mérőszámok figyelembevétele. Az NCA5 a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (USGCRP 2023) weboldalra irányítja az olvasókat, ahol megtekinthetik a városi hőhullámok évtizedenkénti számát az 1960-as évektől kezdve. Ezt a 6.3.7. ábrán mutatjuk be.



6.3.7. ábra: A városi hőhullámok átlagos száma évente 50 nagy amerikai nagyvárosi területen, de a szövegben kifejtett okok miatt ez egy félrevezető mutató. Forrás: <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (hozzáférés: 2025. május 22.).

Az ábra évtizedenként monoton növekedést mutat, az 1960-as években évente két előfordulás volt, a 2020-as években hat. A hőhullám használt definíciója az emberi kellemetlenségek szokatlan, de gyakorlatias mérőszáma – legalább két egymást követő napból álló időszak, amikor a *minimális* látszólagos hőmérséklet (a hőmérséklet és a páratartalom kombinációja) meghaladja a 85. percentilist. Azt is meg kell jegyezni, hogy az adathalmaz az 50 legnagyobb amerikai városra korlátozódik.

A szokatlan hőhullám-definíció és a városi fókusz miatt az USGCRP (2023) által bemutatott, 1960 óta növekvő értékek a hosszú távú trendeket és az üvegházgáz-kibocsátás hatását illetően legalább két okból nem informatívak. Először is, ahogy a 6.3.1. és 6.3.6. ábrán látható, az 1960-as volt a leghidegebb évtized, az 1970-es pedig a második leghidegebb évtized az 1910-es évek óta, így ez a kezdő dátum az idősorban kedvez a növekedés kimutatásának. Másodsor, az 1960 utáni urbanizáció ezekben a városokban jelentős tényező a Tmin emelkedésében az állandósult Tmax-hoz és a közeli vidéki állomások Tmin-jéhez képest (Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, Christy et al. 2009, McNider et al. 2012). Ez nem zárja ki az éjszakai hőmérsékletek valódi emelkedését az Egyesült Államok nagyobb városaiban, és az ezekkel a változásokkal járó társadalmi hatásokat. Megjegyezzük azonban, hogy számos okból kifolyólag a nyári Tmax (különösen a vidéki területeken) jobb mérőszám a háttérklíma változásai által befolyásolt hőhullámok változásainak kimutatására, például ami a növekvő üvegházhatású gázkoncentráció miatt következik be (Christy et al. 2009). A CONUS egészére vonatkozóan az ebben a szakaszban található bizonyítékok arra utalnak, hogy az üvegházgáz-kibocsátás az urbanizáció és a természetes éghajlati változékonyság háttérében csekély vagy semmilyen hatással nem volt a hőhullámokra. Függetlenül a regionális trendek végső okától, a hőhullámoknak fontos társadalmi hatásai vannak, amelyekkel foglalkozni kell, amint azt a 10. fejezetben tárgyaljuk.

TUDÁSDOBOZ: A rövid adatsorok veszélyei

San Francisco jó esettanulmányt nyújt a rövid történelmi minták használatának korlátairól a szélsőséges események természetes változékonyságának jellemzésére. Tegyük fel, hogy San Francisco napi csapadékmennyiségéből az 1895 és 2024 közötti 130 éves mintát használjuk, és 3, 5, 14 és 30 napos csapadékrekordokat keresünk. Az eredményeket a 6.2. táblázat mutatja.

Event	Record (inches)	Year
3-day	6.94	2023
5-day	8.55	2023
14-day	12.62	2023
30-day	18.93	1998

6.2. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1895-2024

A rekordok mind a közelmúltbeli évekre összpontosulnak. 2023 kivételes évnak tűnik, és mivel a minta vége felé közeledik, arra utalhat, hogy az éghajlat veszélyesebb állapotba került, talán emberi hatások miatt. [A „2023” megjegyzés azt jelzi, hogy az esemény a 2022 augusztusa és 2023 júliusa közötti vízévben történt.]

De teljesen más képet kapunk, ha egy 45 évvel korábban, 1850-ben kezdődő adatsort használunk. A 6.3. táblázat azt mutatja, hogy a rekorddöntő események mind az 1860-as években történtek. Továbbá 2023 már nem is a 2. helyen áll, hanem a 3. vagy 4. helyre csúszik vissza. A két diagram adatainak összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1862-es és 1867-es szélsőséges csapadékesemények lényegesen több csapadékot tartalmaztak, mint az 1998-as és 2023-as események, a 14 és 30 napos összesített értékek pedig körülbelül 50 százalékkal magasabbak voltak.

Event	Record (inches)	Year	Rank of 130-yr extreme listed in Table 6.2
3-day	8.85	1867	3
5-day	9.80	1867	3
14-day	19.05	1862	4
30-day	28.25	1862	2

Table 6.3: Extreme rainfall records, San Francisco, 1850-2024.

6.3. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1850-2024.

A természetes változékonyság mértéke még jobban megmutatkozik, ha a paleoklíma-bizonyítékokat is megvizsgáljuk. Porter et al. (2011) felfedezték, hogy a legutóbbi 1800 évben legalább hat megavihar volt intenzívebb, mint a régiót sújtó, pusztító erejű 1861-62-es ARkStorm. Nyilvánvaló, hogy az ilyen szélsőséges események, amelyekre az 1895-2024-es idősorunkban „példátlan” volt, körülbelül 300 évente sújtják a régiót, bár 1895 óta nem történt ilyen.

E példa a viszonylag rövid éghajlati időszakok (~130 év) használatának korlátait szemlélteti az általános természetes változékonyság, és különösen a szélsőséges események jellegének és mértékének felmérésében. A természetes változékonyság teljes tartományának pontos ábrázolása minden attribúciós elemzésben elkerülhetetlen (8.6. szakasz). Az infrastruktúra-tervezők, a katasztrófavédelmi intézmények és az attribúciós kutatók akkor értenék meg egy jövőbeli szélsőség nagyságának jelentős téves jellemzését, ha csak az elmúlt 130 év megfigyeléseire alapoznának. Ebben az esetben egyetlen 130 éves időmintavétel akár 50 százalékkal is alábecsüli azt a szélsőséges értéket, ami mindössze 45 évnyi megfigyelés hozzáadásával határozható meg. Az ezrezeres léptékű paleoklíma bizonyítékokhoz képest még nagyobb alulbecslés történne. Fontos tanulság, hogy az éghajlat önmagában is okozhat nagy meglepetéseket, még emberi befolyás nélkül is.

6.4 Szélsőséges csapadék

Az AR6 értékelése szerint az 1950-es évektől kezdődő adatokban a heves csapadékmennyiség növekedését figyelték meg.

AR6: Az 1950-es évek óta a **heves csapadékesemények gyakorisága és intenzitása nőtt** a legtöbb olyan szárazföldi területen, amelyről a megfigyelési adatok elegendőek a trendelemzéshez (nagy megbízhatóság). (SPM A3.2)

AR6: Észak-Amerikában szilárd bizonyítékok vannak arra vonatkozóan, hogy a szélsőséges **csapadékmennyiség nagysága és intenzitása nagy valószínűséggel nőtt** az 1950-es évek óta. Mind az [egynapos maximumok], mind az [5 napos maximumok] jelentősen megnöttek Észak-Amerikában 1950 és 2018 között. (11. fejezet, 1560. o.)

Az Egyesült Államok nemzeti éghajlat-értékelései (NCA4, NCA5) kiemelték a leghevesebb (különböző módokon definiált) csapadékesemények előfordulásának növekedését, elsősorban a CONUS keleti felében, különösen az északkeleti részén, akár 1901-ben, akár 1958-ban kezdődik az elemzés. Érdekes módon a regionális eltérések azt mutatják, hogy a szélsőséges csapadékesemények legnagyobb növekedése északkeleten, a legkisebb pedig nyugaton figyelhető meg, ami ellentétes a hőmérsékleti szélsőségek változásaival (6.3.6. ábra).

McKittrick és Christy (2019) hosszú távú és következetes állomási megfigyeléseket végeztek a szélsőséges napi csapadékmennyiségről, hogy teszteljék az NCA állításainak egy részét a délkeleti és nyugati partra vonatkozóan egy olyan trendmodell segítségével, amely nem paraméteres varianciabecslést tartalmazott, és ami robusztus a csapadékadatok komplex autokorrelációs tulajdonságaival szemben. Amikor az idősorokat visszafelé kiterjesztették (egy esetben akár 1872-ig), vagy később (1978) kezdték, egyik régióra sem kaptak szignifikáns trendet.

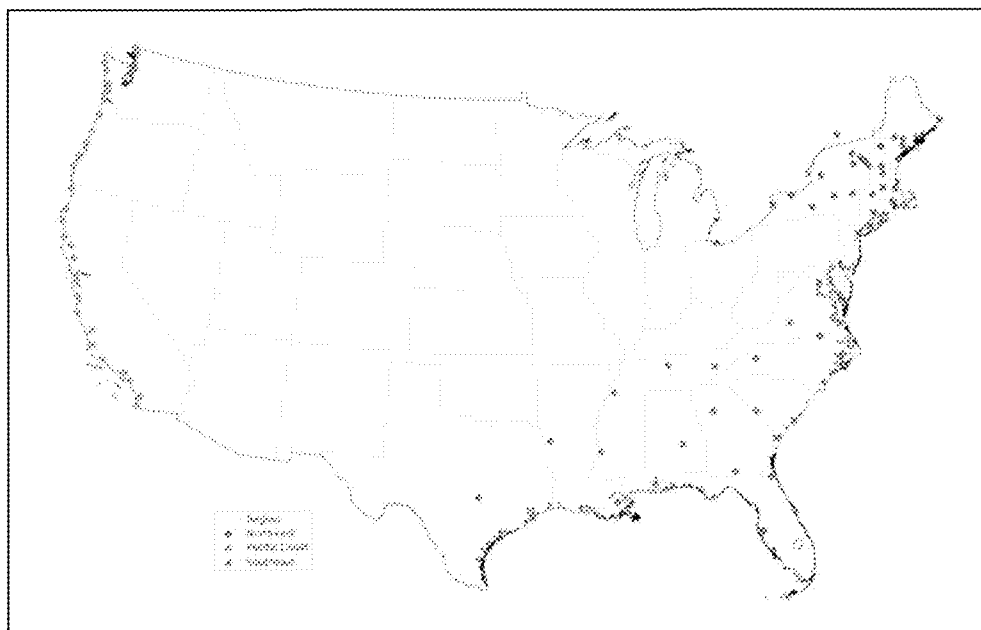
Ezen eredményeket ehhez a jelentéshez (McKittrick és Christy 2025) hasonlóan felépített megfigyelésekkel frissítettük: 29 állomással a CONUS csendes-óceáni partvidékén (1893, San Diegótól (Kalifornia) Blaine-ig (Washington)) és 24 állomással a párás délkeleten (1872, Austintól (Texas) Washington DC-ig). Továbbá az északkeleti területet 27 állomással bővítettük (1888, Buffalótól (New York) Eastportig (Maine)). A helyszíneket a 6.4.1. ábra mutatja. Az állomásokat a hosszú távú, kiváló minőségű adatok elérhetősége alapján választottuk ki. A régiók mindegyike mutatja a szélsőséges csapadékviselkedés fontos jellemzőit: a csendes-óceáni partvidék a partra érkező légköri folyókkal van összefüggésben, amelyek esetében az AR6 1948 óta növekvő aktivitásról szolgáltat bizonyítékokat, és azt állítja, hogy a világ melegedésével további növekedés várható (AR6 8.3.2.8.2); az NCA jelentése szerint az északkeleten tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb mértékű növekedését. Az NCA-k a délkeleti területet is megemlítették, mint a szélsőséges események megnövekedésével jellemzett területet. McKittrick és Christy (2019) elemzését alkalmazva a régiónkénti eredményeket (és azok magyarázatai) a következők voltak.

Heves esőzések a Csendes-óceáni parton

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje statisztikailag szignifikáns (csökkenő) Astoriában, (Oregonban); máshol nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és szignifikáns Big Surben (Kaliforniában); máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Aberdeenben (Washington államban) és Big Surben (Kaliforniában), valamint negatív és szignifikáns az Oregonbeli Newportban (máshol nem szignifikáns).

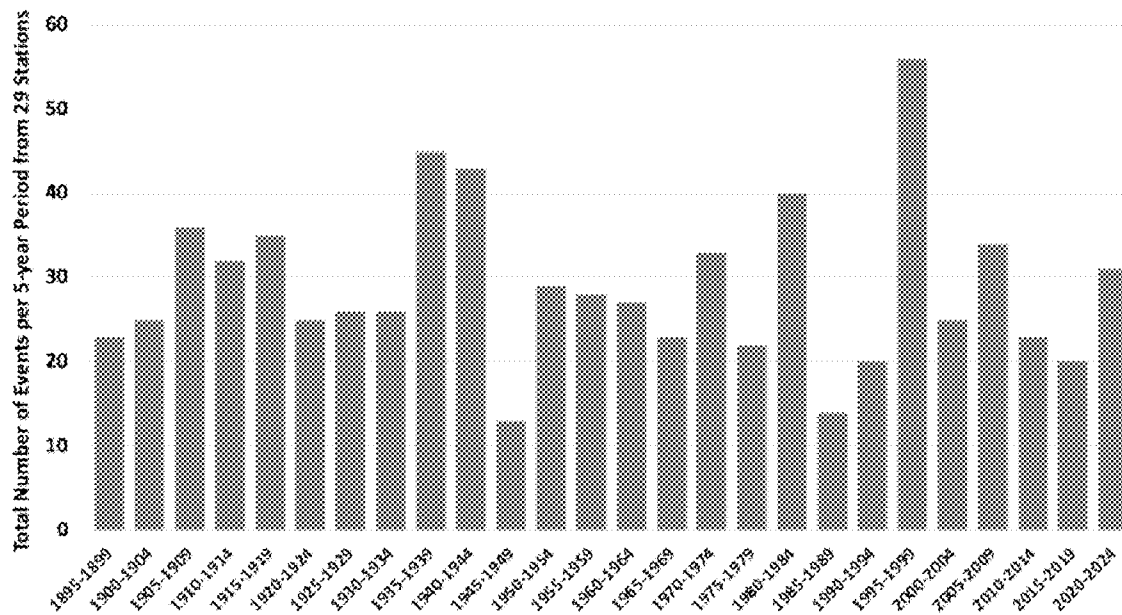
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

A Csendes-óceáni partvidék jelentős mennyiségű csapadékot kap a légköri folyók (AR) eseményeiből, amelyek gyakran tartanak egy-két napnál tovább (pl. Gershunov et al. 2017, Pan et al. 2024). A közelmúlt történelmének legrosszabb ilyen eseménysorozata az úgynevezett ARkStorm volt, amely 1861 decemberében és 1862 januárjában történt; Kalifornia egyes részeinre közel 3 méternyi esőt zúdított, és a teljes Central Valley-t hetekre helyenként 4,5 méternyi vízzel borította (Brewer 1930, Null és Hulbert 2007). Ezenkívül paleoklíma-kutatók Kaliforniában a legutóbbi 1800 évben hat, az 1861–1862-esnél hevesebb megárvírt találtak, körülbelül 300 éves időközönként (Porter et al. 2011).

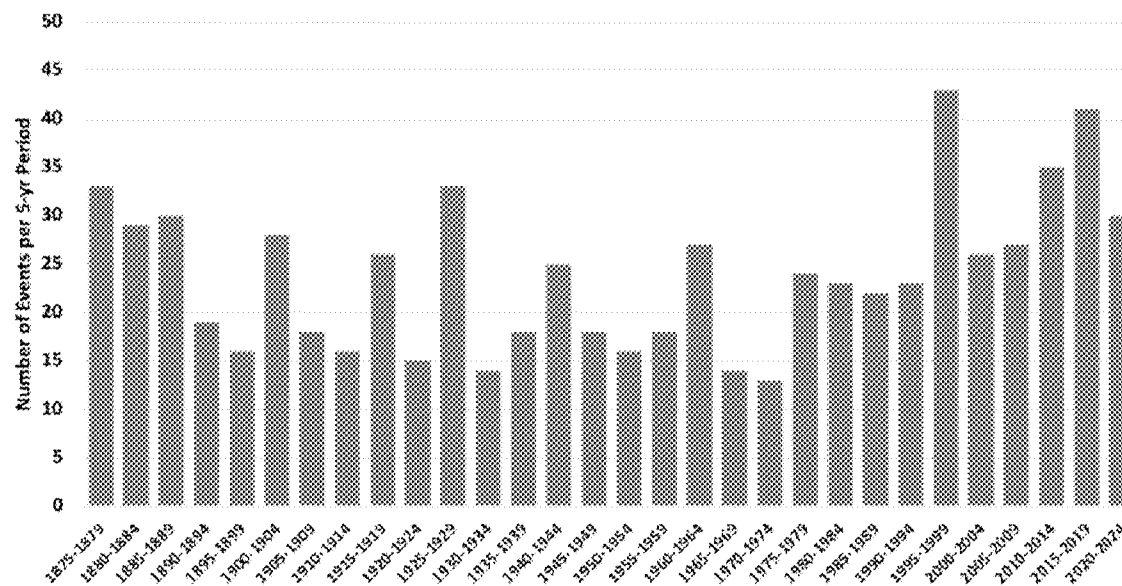


6.4.1. ábra: A jelentésben használt csapadékmérő állomások helyszínei. Narancssárga: Csendes-óceáni partvidék. Kék: Északkelet. Zöld: Délkelet. Adatok: McKittrick és Christy (2025).

Az 5 napos özönvizek előfordulását a következőképpen vizsgáljuk meg. A csendes-óceáni partvidéket példaként véve, egy 130 éves időszak 5 éves intervallumotkból 26-ot tartalmaz. Minden helyszínen kiszámítottuk az év 5 napos csapadékösszegét, és kiválasztottuk a mintában a 26 legmagasabb értéket. Egyetlen évben a 26 leghevesebb közül több is előfordulhat. Ezek mindegyike 5 évente 1-szer előforduló eseménynek tekinthető. Ha nincsenek trendek a csapadékmennyiségben, akkor ezeknek az eseményeknek az összes állomáson egyenletesen kell eloszlania az évek során. A 6.4.2. ábrán ezen események időbeli eloszlását mutatjuk be a csendes-óceáni parton. Jól láthatóak az 1997-98-as nagyszabású El Niño eseményhez kapcsolódó özönvizek. Bár szeszélyesek, ahogy az az ilyen csapadékmennyiség-mérőszámokra jellemző, nincs arra utaló jel, hogy idővel gyakoribbá válnának.



6.4.2. ábra: A 26 legsúlyosabb (5 évenként 1) előfordulás időbeli eloszlása 5 éves időszakokra a csendes-óceáni parton található 29 állomáson.



6.4.3. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a legsúlyosabb 30 (5 évenként 1) eseményre vonatkozóan 24 állomáson a párás délkeleti régióban, Austintól Washington DC-ig, 5 éves időszakokra bontva, 1875-2024 között.

Délkeleti heves esőzések

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama) és Quitman-ben (Georgia), de másutt nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama), de másutt nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Vicksburg-ban (Mississippi) és Norfolk-ban (Virginia), de másutt nem szignifikáns.
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

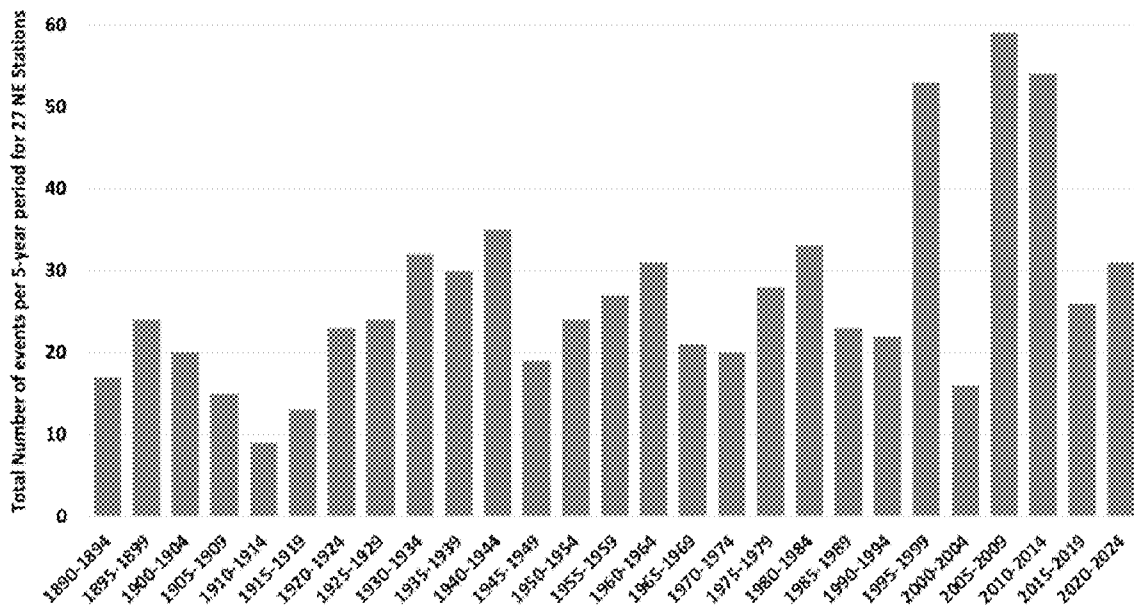
A 6.4.3. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 150 évre vonatkozóan a délkeleti párás zónában. Az 5 évente 1 alkalommal előforduló heves esőzések 5 napos összesítéseinek időbeli mintázata általában nem figyelemre méltó, bár 1995 és 2019 között magasabb értékek csoportja jelenik meg. Az ezekben az években tapasztalt növekedés nagyrészt a 4 legészakkeletibb állomásnak köszönhető: Wilmington NC, Weldon NC, Washington DC és Norfolk VA. Ez megerősíti az NCA4 és NCA5 által jelzett mintázatot – a heves esőzések gyakoriságának növekedését a trópusi viharok keleti (Észak-Karolinától Maine-ig tartó) időbeli csoportosulása miatt, amelyet alább tárgyalunk. Egyébként a fennmaradó 20 állomás a heves esőzések időbeli eloszlása szempontjából nem figyelemre méltó.

Északkeleti heves esőzések

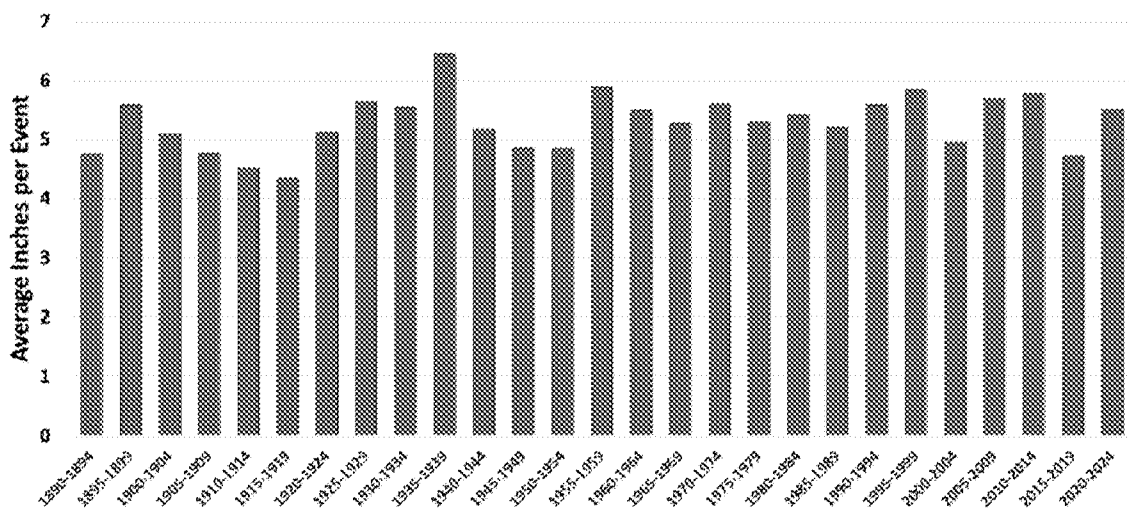
- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns a 27 helyszínből 12-ben, valamint a regionális átlagban is.
- A csapadékmennyiség ingadozásának trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Albany NY, Buffalo NY és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Gardiner ME és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A régió összes állomására átlagolva sem a csapadékmennyiség ingadozásában, sem a maximum csapadékmennyiségben nincs statisztikailag szignifikáns trend.

A 6.4.4. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 135 évben az északkeleti 27 állomáson (beleértve Montrealt is Kanadában). Itt 3 napos összesítéseket használunk, mivel ez eredményezte a legnagyobb időbeli eltéréseket. Ebben a régióban az események 77 százaléka júniustól októberig következik be, és hurrikánok, trópusi viharok vagy extratrópusi rendszerekbe átmenő trópusi viharok betörései dominálnak bennük. Az NCA4 és NCA5 szerint ebben a régióban tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb növekedését, ezért ezt érdemes közelebbről megvizsgálni.

Észrevehető a szélsőséges események egyfajta csoportosulása 1995 és 2014 között. Howarth et al. (2019) egy hasonló régiót vizsgáltak, mint ami a 6.4.4. ábrán szerepel. Magában foglalja Pennsylvaniát és New Jersey-t, és jelentős különbségekről számoltak be a különböző csapadékszélsőségekben két 18 éves időszak (1979-96, 1997-2014) között. A 6 hüvelyknél nagyobb 24 órás események 317 százalékos növekedését mutatták ki. Mi ugyanezen évekhez képesen 58 százalékos növekedést tapasztaltunk. A 6.4.4. ábra azonban azt mutatja, hogy a gyakoriság 2014 után meredeken csökken, és a következő 5 éves intervallumokban visszatér a hosszú távú átlaghoz, ami ismét illusztrálja a rövid távú trendekből levont következtetések veszélyeit, amikor nagy változások vannak.



6.4.4. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a leghevesebb 27 (5 évente 1 alkalommal előforduló) 3 napos csapadékeseményre vonatkozóan 27 északkeleti állomáson New Yorktól ME-ig, beleértve Montrealt is.



6.4.5. ábra: Az 5 évente 1 alkalommal előforduló események során hulló átlagos csapadékmennyiség az északkeleti állomásokon.

A Howarth et al. mintájában tapasztalt magas százalékos növekedés viszonylag kevés helyszínen kis számokkal jár együtt: 58 állomáson az első időszakban mindössze 6, a másodikban pedig 25 eset történt. A legtöbb állomás nem regisztrált ilyen eseményt. Ha régiószerte növekedés tapasztalható a heves eseményekben, akkor annak az összes állomás átlagában látszania kell. A 6.4.5. ábra az ÉK-i 1:5 évente előforduló események átlagos csapadékmennyiségét mutatja. A tendencia mindössze +0,04 hüvelyk/évtized. A legmagasabb mennyiség, 1935-39, magában foglalja az 1938-as Nagy Új-Angliai Hurrikánt, amely egyike volt a régiót sújtó ritka jelentős (3-as vagy magasabb kategóriájú) hurrikánoknak. A 6.4.4. és 6.4.5. ábrákon látható eredmények tehát arra utalnak, hogy

bár az 1995 és 2014 közötti időszakban néhány helyszínen megugrott az események száma, a minta, nem volt regionális, és a változás 2014 után nem maradt fenn.

Jong et al. (2024) az északkeleti régió csapadékeseményeiben 1959 óta a trópusi hatások növekedését dokumentálja, és arra a következtetésre jutott, hogy „az őszi szélsőséges csapadéktrend az USA északkeleti részén az 1990-es évek óta elsősorban a trópusi ciklonokhoz kapcsolódó eseményeknek tulajdonítható.” A kérdés tehát a következő: „A trópusi rendszer 1997 és 2014 közötti, az északkeleti régiót érintő időbeli csoportosulása az emelkedő üvegházgáz-koncentrációra adott válasz volt-e?” Jong et al. megvizsgálták a CMIP-6 modell eredményeit, amelyek azt sugallják, hogy a 21. században kevesebb ilyen rendszer lesz, de a csapadékesemények intenzitása növekedhet. Ez a feltételezés nem látható a 6.4.5. ábrán, ahol a 135 éves időszak alatt az eseményenkénti mennyiség állandó maradt.

Vannak bizonyítékok arra, hogy a leghevesebb csapadékesemények újraeloszhatnak a városi infrastruktúra helyi időjárásra gyakorolt hatása miatt (pl. Pielke Sr. et al. 2011, Zhang et al. 2018, Yang et al. 2024). Yang et al. kijelentik: „A kompakt beépítésű városokban a belvároshoz képest nagyobb mértékű a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés tapasztalható, mint a vidéki környezetben, míg a szétszórta beépítésű városokban a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés csökken.” Bár ez egy fontos szempont, az ebben az elemzésben használt konkrét állomásokra gyakorolt hatás ismeretlen, vagy legalábbis nem mutatható ki a 6.4.5. ábrán.

Összefoglalva, egyes amerikai régiókban rövid ideig tartó növekedés tapasztalható a szélsőséges csapadékeseményekben, ami összhangban van a természetes változékonysággal. A hosszú távú, országos történelmi feljegyzések elemzése azonban, amely figyelembe veszi a csapadékatatok autokorrelációs tulajdonságait, nem támasztja alá azt az állítást, hogy a szélsőséges, rövid ideig tartó csapadékesemények gyakoribbak vagy intenzívebbek lennének.

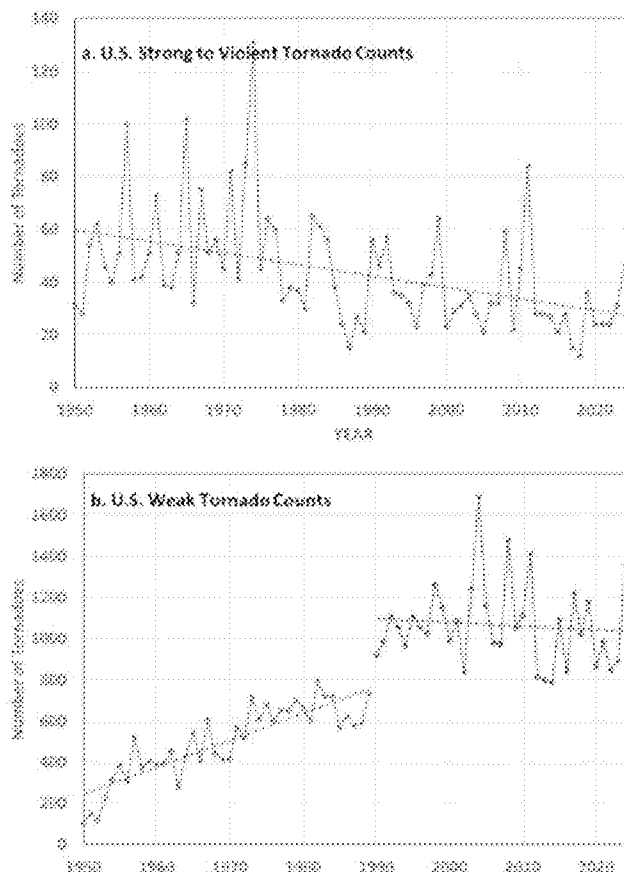
6.5 Tornádók

Az AR6 a következőképpen értékeli a tornádók trendjeit az Egyesült Államokban:

[A] súlyos konvektív viharokhoz kapcsolódó tornádók, jégesők és villámlások megfigyelési trendjei nem észlelhető megbízhatóan a hosszú távú megfigyelések elégtelen lefedettsége miatt. *Közepes megbízhatóságú*, hogy az Egyesült Államokban a tornádók átlagos éves száma viszonylag állandó maradt. (11. fejezet, 11.7.3. szakasz, 1594. oldal)

A gyenge tornádók megfigyelése az idők folyamán megváltozott. A vidéki népesség növekedése és a kézi eszközökkel történő videofelvételkészítés növekvő lehetősége, ahhoz vezetett, hogy gyakrabban tettek jelentést minimális károkat okozó gyenge tornádókról. Ezzel szemben az erős és heves tornádók megfigyelése idővel következetesebb lett. Megjegyzendő, hogy a tornádó erősségét az általa okozott károk alapján mérik, nem pedig a tölcser vizuális megjelenése alapján. A korábbi évtizedekben a korlátozott valós idejű megfigyelési képességek nem akadályozták meg az azonosítást, mivel az erős és heves tornádók sokkal nagyobb károkat okoznak, amelyeket később fognak felmérni, még akkor is, ha magát a tornádót nem figyelték meg. Amióta 1950-ben elkezdődött a statisztika, jelentősen (körülbelül 50%-kal) csökkent az erős és heves tornádók száma, amint azt a 6.5.1a. ábra is mutatja.

Összefoglalva, 1950 óta az Egyesült Államokban a súlyos tornádók száma észrevehetően csökkenő tendenciát mutat. 1990 után az Egyesült Államokban a gyenge tornádók száma nagyjából állandó maradt; az azt megelőző adatok hiányosak a megfigyelés korlátozottsága miatt.



6.5.1. ábra: Az Egyesült Államokban évente előforduló tornádók száma (a) erős és heves tornádók (EF3-tól EF5-ig) és (b) gyenge tornádók (EF0-tól EF2-ig) tekintetében. A NOAA Viharelőrejelző Központ adatai alapján, amelyek a https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv címen érhetők el.

6.6 Árvizek

Az árvizekben bekövetkezett változásokat a következőképpen értékelték:

AR6: Globális szinten megfigyelt változások tekintetében az árvizek nagyságrendjére vagy gyakoriságára az SREX *alacsony megbízhatósági szintet* mért. Ezt az értékelést megerősítette az AR5 jelentés is. Az SR15 egyes régiókban az árvízgyakoriságnövekedést és szélsőséges vízhozamot talált, más régiókban viszont csökkenést. . . [A] megfigyelt árvízváltozásokról szóló hidrológiai szakirodalom heterogén, regionális és szubregionális medenceszintekre összpontosít, ami megnehezíti a globális, és néha regionális szintek szerinti szintézist. (11.5. fejezet)

AR6: A hideg régiókban, ahol a felmelegedésre válaszul (nagy megbízhatósági szinten) a hóolvadás uralja az áramlási rendszert, az árvizek szezonális megváltozása megfigyelhető. Az elmúlt évtizedek csúcspontjához kapcsolódó trendjeivel kapcsolatos megbízhatóság globális szinten *alacsony*. (11.5. fejezet)

NCA4: Az extrém magas vízhozamértékek trendjei vegyesek az Egyesült Államokban. 200 amerikai vízfolyásmérő elemzése növekvő és csökkenő árvízi nagyságú területeket is mutat, de **nem szolgáltat szilárd bizonyítékot** arra vonatkozóan, hogy ezek a tendenciák emberi hatásoknak lennének tulajdoníthatók (240-241. o.)

Az árvizekben USA-szerre kimutatható trendek hiánya összhangban van a 6.4. szakaszban szereplő megállapítással, amiszert a szélsőséges csapadékmennyiségben nem mutatkozik koherens változás.

6.7 Szárazság

Az aszálytrendek értékelése a következő volt.

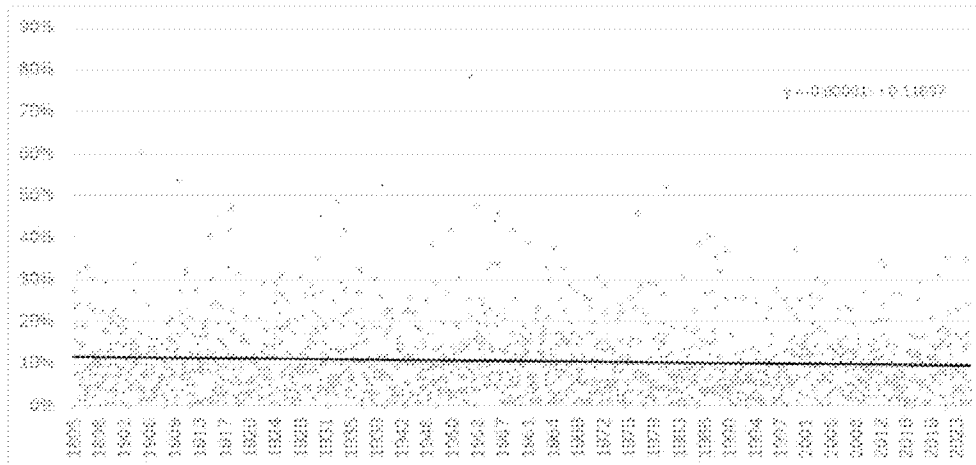
AR6: Kevés AR6 régióban figyeltek meg a meteorológiai aszály növekedését (11.9. szakasz, 1575. o.),

AR6: A mezőgazdasági és ökológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg minden kontinensen (*közepes megbízhatóság*), de csak egy AR6 régióban csökkenést (*közepes megbízhatóság*). A hidrológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg néhány AR6 régióban. (11. fejezet összefoglalása)

NCA4: A megnövekedett csapadékmennyiség következtében az **aszálystatisztika az egész CONUS-ban csökkent.** (233. o.)

NCA4: A közelmúltbeli aszályok és a kapcsolódó hóhullámok rekordintenzitást értek el az Egyesült Államok egyes régióiban; földrajzi léptékét és időtartamát tekintve azonban az **1930-as évekbeli porvihar-korszak történelmi feljegyzései továbbra is referencia aszályának és szélsőséges hőség eseményének számít** (nagyon magas megbízhatóság). (231. o.)

SREX: A paleoklíma szempontból a közelmúltbeli aszályok nem példa nélküliek, súlyos „megaszárazságokról” számoltak be a paleoklíma-feljegyzésekben Európából, Észak-Amerikából és Ausztráliából. (170. o.)



6.7.1. ábra: A „nagyon száraz” minősítés havi százalékos aránya az USA-ban, 1895–2025. Adatforrás: NOAA <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0> , amihez a legkisebb négyzetes trendvonal hozzá lett adva.

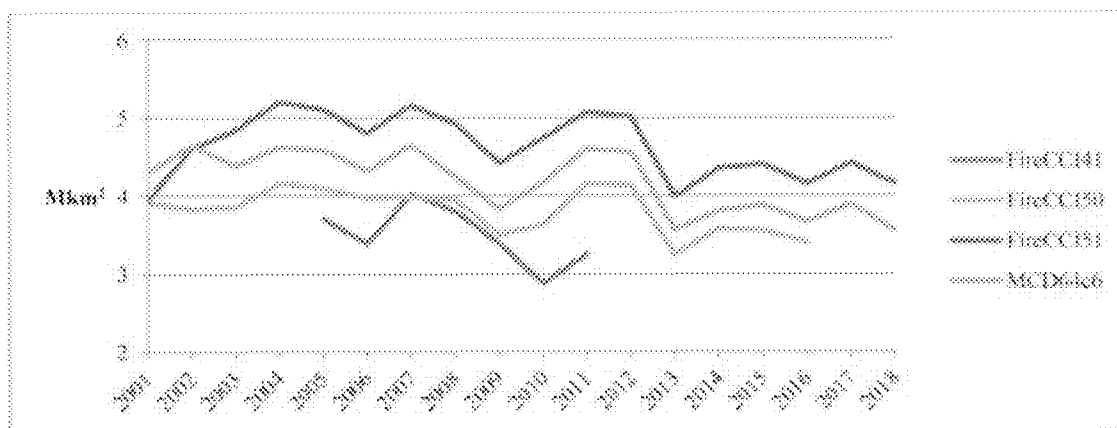
Amint a 6.7.1. ábrán látható, az Egyesült Államok hosszú távú adatai a szélsőséges szárazságban jelentéktelenül csökkenő tendenciát mutatnak (-0,001 százalék évente).

Kogan et al. (2020) egy 38 éves, nagy felbontású, műholdas aszálymérést vizsgált, és arra a következtetésre jut, hogy a globális aszály nem erősödött fel, és nem kapcsolódik az éghajlatváltozáshoz: „határozottan kijelenthető, hogy a globális és a főbb gabonatermelő országok aszályos területeinek és intenzitásának trendjei az 1980-as évek óta nem követik a globális éghajlati felmelegedést.”

Összefoglalva, nincs bizonyíték arra, hogy az elmúlt évtizedekben az Egyesült Államokban vagy globálisan megnövekedett volna a meteorológiai aszályok gyakorisága vagy intenzitása.

6.8 Futótüzek

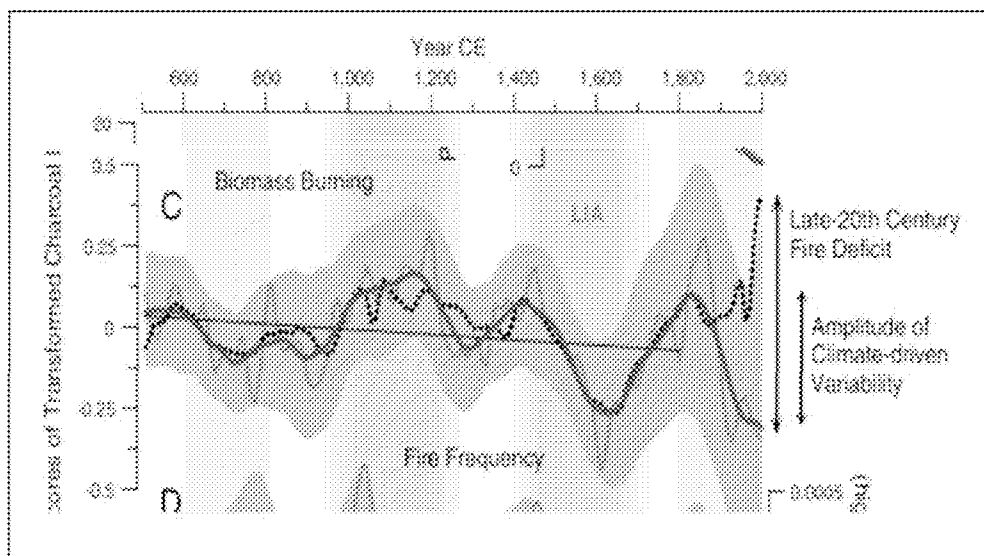
Az IPCC nem adott ki adatelemzést a futótüzek okairól. Amint a 6.8.1. ábra mutatja, az Európai Űrügynökség által mért globális futótűz-aktivitás a 21. században csökkenő tendenciát mutat.



6.8.1. ábra: Globális tűzvészek kiterjedése, 2001–2018. Forrás: Lizundia-Loiola et al. (2021) 12. ábrája alapján. A különféle színű vonalak különféle műholdakból és algoritmusokból származó adattermékeket jelölnek.

A globális adatok azt mutatják, hogy a futótűz-kiterjedtség minden kontinensen állandó vagy csökken (Samborska és Ritchie, 2024). Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy egyes régiókban a tűz-intenzitás rosszabbodik (Cunningham et al. 2024), és hogy a futótüzek 2001 és 2019 között a globális erdőborításban nettó csökkenést okoztak (Tyukavina et al. 2022).

Az Egyesült Államokban 1900-ban elkezdett aktív tűzoltási gyakorlat megnehezíti a futótűz-aktivitás természetes alapértékének meghatározását. A paleoklíma-bizonyítékok azt mutatják, hogy a múltbeli aktivitás sokkal magasabb volt, mint a mai. Marlon et al. (2012) üledékes faszénrétegeket használt az Egyesült Államok nyugati része tűztörténetének rekonstruálására az elmúlt 1400 évben, és emodelt is illesztett a tűzaktivitás éghajlati viszonyok függvényében történő előrejelzésére. Eredményeiket az alábbi 6.8.2. ábra foglalja össze (a cikkük 2. ábrájából). A 20. században egyre nagyobb a futótüzek hiánya. Más szóval, bármennyi tüzet is figyeltek meg a 20. században, az kevesebb volt, mint amit az éghajlati viszonyok alapján az előző évszázadokban megfigyelhettek volna. Parks et al. (2025) hasonlóan állapított meg: az észak-amerikai futótüzek égési területének közelmúltbeli növekedése ellenére a történelmi futótüzek gyakoriságához képest továbbra is jelentős futótűz-hiány áll fenn.

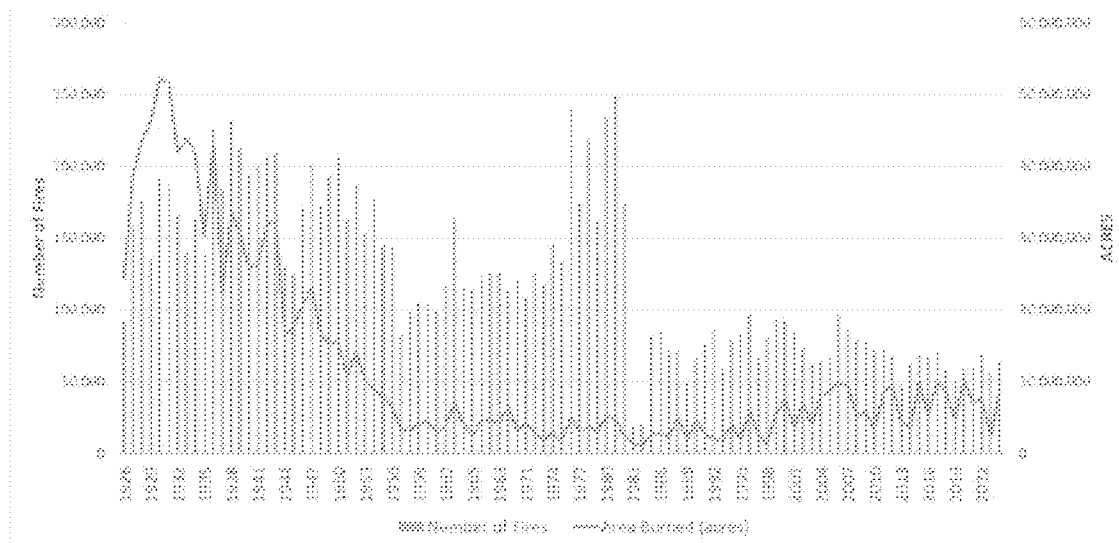


6.8.2. ábra: Tűzgyakoriság és tűzhiány az Egyesült Államokban. A piros vonal a simított faszénrekordot, a fekete szaggatott vonal pedig az éghajlati viszonyok alapján előrejelzett faszénrekordot mutatja. Forrás: Marlon et al. (2012) 2. ábra.

Az amerikai Nemzeti Ügynökségek Közötti Tűzoltóközpont (NIFC) 1926 és 2023 közötti adatait a 6.8.3. ábra mutatja. Az NIFC eltávolította az 1960 előtti adatokat jelenlegi weboldaláról, azzal az indokkal, hogy a mérési módszerek 1960 után megváltoztak, így az összehasonlítás megbízhatatlanná válik. Mindazonáltal, ha csak az 1985 utáni időszakra koncentrálunk, a tüzek száma nem növekszik. A leégett terület valóban nőtt, de csak körülbelül 2007-ig.

Az erdő- és bozóttüzek mindig is részét képezték a természetnek, és minden bizonnyal teremthetnek olyan körülményeket, amelyek rövid távon minden élőlény számára, beleértve az embert is, barátságtalanok. A tudomány megerősítette a futótüzek általános előnyeit és szükségességét. Míg a közelmúltbeli nagy horderejű tüzek és évszakok emlékeztetnek a potenciális pusztító hatásra, a legnagyobb horderejű amerikai futótűz továbbra is az 1910-es ún. nagy robbanás az Egyesült Államok nyugati részén, ami több mint hárommillió hektárt pusztított el, és egész városokat semmisített meg, mint például Taft, MT (Apple, 2020). Az 1910-es tűzvész átalakította az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálatát (National Forest Foundation 2022), ami a tűzoltásra helyezte a hangsúlyt, elsődleges célként az összes erdő- és bozóttűz megfékezését tűzve ki (Forest History Society, 2022). Ez vezetett az 1935-ös „10 órás szabályhoz”, amely előírta, hogy minden, bármely napon észlelt tüzet másnap reggel 10 óráig meg kell fékezni (National Forest Foundation, 2022).

Nemes célnak tűnik ugyan mindenféle futótűz elfojtása, felmerültek a kérdések, hogy ez a viselkedés vajon „követi-e a tudományt” (U.S. Forest Service, 2022). Idővel az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálat elkezdte újragondolni céljait, felismerve, hogy az olyan új megközelítések, mint az előírt égetések, a tüzelőanyagok kiküszöbölése és az ellenőrzött erdőtüzek megfelelőbbek (Sommer, 2016). A legújabb kutatások igazolják ezt a megközelítést, és elismerik, hogy a gyakoribb kisebb tüzek valószínűleg egészségesebb erdőket, vízi ökoszisztémákat és biológiai sokféleséget eredményeznek (Stephens et al., 2021).



6.8.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli erdő- és bozóttüzek száma 1926 és 2023 között. Forrás: 2018 utáni adatok: National InterAgency Fire Center adatok <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>. 2017 előtti adatok: webarchive.org (dátum nélkül)

Hivatkozások

- Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. The Spokesman-Review. <https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/>
- Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, “Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity,” *Journal of Climate* 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, <https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1>.
- Brewer, W. H. (1930). *Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer*. University of California Press.
- Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342–3356. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1>
- Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature’s style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23). <https://doi.org/10.1029/2005GL024476>
- Colorado State University. (2025). Realtime tropical cyclone guidance. <https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php>
- Cunningham, C.X., G.J. Williamson, and D. Bowman (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology and Evolution* 8, 1420–1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Forest History Society (2022). The 1910 fires. <https://foresthistory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/>
- Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052979>
- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017GL074175>
- Goldenberg, Stanley et al., “The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications,” *Science* 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, <https://doi.org/10.1126/science.1060040>.
- Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 673–689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 776–808.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. *Earth's Future*, 12, e2023EF004370. <https://doi.org/10.1029/2023EF004370>
- Karl, T.R., H.F. Diaz, and G. Kukla. (1988): Urbanization: Its detection and effect on the United States climate record. *Journal of Climate*, 1, 1099-1123 https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/1/11/1520-0442_1988_001_1099_uidaei_2_0_co_2.xml
- Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.
- Klotzbach, Phil et al. (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1>.
- Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) “Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security” *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 11(1)
- Koutsoyiannis, D. (2013) *Hydrology and Change*. *Hydrological Sciences Journal* 58(6) <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>
- Lizundia-Loiola, J., et al. (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 236, 111493, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>
- Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6, 399–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin et al. (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA *Proceedings of the National Academy of Sciences* February 14 2012 <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>
- Maue, R. N. (2025). *Climatlas: Tropical cyclones*. <https://climatlas.com/tropical/>
- Maue, R. N. (2011) Recent historically low tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters* 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>
- McKittrick, R. and J.R. Christy (2025), “Data and Code for CWG2025 Report”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/by76s7rxfb.1
- McNider, R.T., G.J. Steeneveld, A.A.M. Holtslag, R.A. Pielke Sr., S. Mackaro, A. Pour-Biazar, J. Walters, U. Nair, and J.R. Christy, 2012: Response and sensitivity of the nocturnal boundary layer over land to added longwave radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*, 117, D14106, doi:10.1029/2012JD017578.
- Null, J. and J. Hulbert, “California Washed Away: The Great Flood of 1862,” *Weatherwise* 60, no. 1 (2007): 26–30, <https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30>
- National Forest Foundation. (2022). Blazing battles: The 1910 fire and its legacy. <https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy>
- National Interagency Fire Center. (2024). Wildfire statistics. <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>
- NCA4. (2017). Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- NCA5. (2023). Fifth National Climate Assessment (A. R. Crimmins et al., Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1> (accessed May 22, 2025)
- NOAA Hurricane Research Division. (2025a). All U.S. hurricanes (1851–2019). https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

- NOAA Hurricane Research Division. (2025b). Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html
- Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, 12(11), 1434. <https://doi.org/10.3390/atmos12111434>
- Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. *Communications Earth and Environment*, 5, 378. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y>
- Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis et al. (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. *Nature Communications* 16 <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8>
- Pielke, R. A., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Porter, K., et al. (2011). Overview of the ARkStorm scenario. U.S. Geological Survey.
- Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
- Runnalls, K.E. and T.R. Oke, 2006: Technique to detect microclimate inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *Journal of Climate*, 19, 959–978. <https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1>
- Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/wildfires>
- Seneviratne, S. et al. (2021) “Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.” In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. KQED. <https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires>
- Stephens, Scott et al., (2021) “Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win,” *Environmental Research Communications* 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2>.
- Tyukavina Alexandra , Peter Potapov, Matthew Hansen et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, *Frontiers in Remote Sensing*. Volume 3 <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.825190/full>
- U.S. Forest Service. (2022). Managing fire. <https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire>
- USGCRP. (2023). USGCRP indicators platform: Heat waves. <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>
- Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) “Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density,” *Journal of Climate* 24, no. 6 (2011): 1736–1746, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>.
- Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, “U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios,” *Monthly Weather Review* 140, no. 1 (January 2012): 44–65, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1>.
- Web Archive. (n.d.). Archive of NIFC fire data. https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html
- Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, et al. (2024). Urban development pattern’s influence on extreme rainfall occurrences. *Nature Communications*, 15, 3997. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5>
- Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, 384–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

Fejezet-összefoglaló

1900 óta az átlagos tengerszint globálisan körülbelül 8 hüvelykkel (kb. 20 cm-rel) emelkedett. Az Egyesült Államok partjai mentén a tengerszintváltozás rendkívül változó: összefüggésben áll a süllyedésre vezető folyamatok helyi váltoásaival, valamint az óceáni áramlási mintázatokkal. Az Egyesült Államok partjainál a legnagyobb mértékű tengerszint-emelkedés Galveston, New Orleans és a Chesapeake-öböl régióiban figyelhető meg – e helyek mindegyikén jelentős helyi szárazföldi süllyedés (süppedés) tapasztalható, ami az éghajlatváltozással nincs összefüggésben.

A globális tengerszint-emelkedés szélsőséges előrejelzései egy valószínűtlen, szélsőséges kibocsátási forgatókönyvből, valamint egy jégtakaró-instabilitást feltételező folyamat félreértéséből erednek. Az AR6 2050-re vonatkozó előrejelzéseinek értékelése idején (az 1995–2014 közötti időszakra vonatkoztatva) 2025-re az időszak közel fele eltelt, a tengerszint pedig az előre jelzettől lassabb ütemben emelkedik. Az Egyesült Államok mareográfjainak (partmenti tengerszint-mérőinek) mérési adatai nem mutatnak a tengerszint-emelkedés történelmi üteménél nagyobb gyorsulást.

7.1 Globális tengerszint-emelkedés

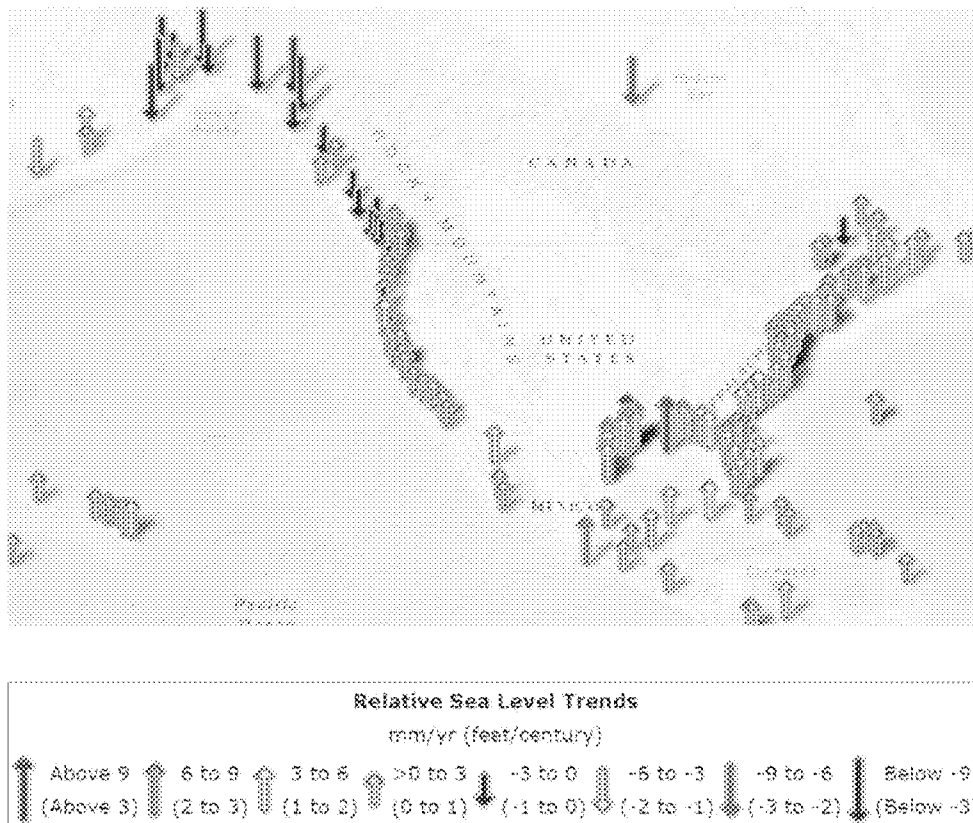
A globális tengerszint-emelkedés vitathatatlanul a legfontosabb éghajlati hatásmechanizmus, amely egyértelműen összefügg a hőmérséklet emelkedésével. Globális szinten a felmelegedés a tengervíz hőtágulása, valamint a gleccserek és jégtakarók olvadása révén emeli a tengerszintet. A szárazföldi víztárolás változásai egy másik fontos tényezőt jelentenek. Regionális szinten a tengerszint változását a nagymértékű óceáni cirkulációs mintázatok, valamint a jég és a víz újraeloszlásából eredő geológiai folyamatok és deformációk befolyásolják. Lokálisan a geológiai folyamatokból, a talajvíz-kivonásból és a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséből eredő függőleges szárazföldi mozgás is fontos.

Az AR6 becslése szerint a globális átlagos tengerszint 1901 és 2018 között 7,9 (5,9–9,8) hüvelykkel emelkedett, és a tengerszint-emelkedés üteme az elmúlt évtizedekben gyorsult. Az óceáni medence szintjén az 1993–2018 közötti időszakban a tengerszint a Csendes-óceán nyugati részén emelkedett a leggyorsabban, a Csendes-óceán keleti részén pedig a leglassabban (Fox-Kemper et al., 2021). A globális tengerszint-emelkedés ütemét évi 0,12 hüvelykre becsülik, ami körülbelül két egymásra rakott egypenny-s érme magasságának felel meg (NASA, 2020).

A globális tengerszint-emelkedés megfigyelőrendszerei jelentősen fejlődtek a műholdas korszakban, különösen a műholdas magasságmérők 1993-as megjelenésével. A helyi partmenti tengerszintmérők (mareográfok) hasznos adatokat szolgáltatnak az elmúlt évszázadra, sőt néhány helyszín esetében még hosszabb időre visszamenően is. A Kis Jégkorszak tizenkilencedik század közepi végetérését követően a tengerszintmérők azt mutatják, hogy a globális átlagos tengerszint az 1820–1860 közötti időszakban kezdett emelkedni, jóval a antropogén üvegházgáz-kibocsátás meglődulása előtt.

7.2 Az USA tengerszint-emelkedése

A globális átlagos tengerszint-emelkedés megfigyelt és előrejelzett ütemének helyi folyamatok miatt bizonyos helyszíneken kevés klimatológiai jelentősége lehet (NOAA, 2025). A 7.1. ábra azt mutatja, hogy Kanadában és Alaszkában (valamint Washington északi részén) a tengerszint a glaciális felpattanásból eredő emelkedés miatt csökken. A csendes-óceáni partvidék tengerszint-mérőinek többsége alacsony tengerszint-emelkedési ütemet mutat, míg az Egyesült Államokban a legnagyobb értékek a Mexikói-öböl partján (Louisiana és Texas), valamint az Atlanti-óceán középső részén fekvő államokban (a Chesapeake-öböl régiójában) figyelhetők meg.



7.1. ábra: Az Egyesült Államok partvidékének relatív tengerszint-emelkedési ütemét ábrázoló térkép (NOAA, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>). Referenciaként 3 mm = 0,12 hüvelyk.

A mareográfok által mért relatív tengerszint-emelkedés összemosza a tengervíz térfogatának éghajlati szempontból releváns növekedését a lokális függőleges szárazföldi mozgással. Ez utóbbit, amely helyenként változik, a legjobban egy, a mareográf közelében elhelyezett GPS-állomással lehet mérni. A szárazföldi mozgást számos folyamat vezérli, és hatásuk összehasonlíthatók az éghajlati jellel, és lokálisan súlyosbíthatják (süllyedés/süppedés esetén) vagy enyhíthetik (emelkedés esetén) a tengerszint-emelkedés kockázatát (Wöppelmann és Marcos, 2016). A süllyedést kiváltó emberi tevékenységek gyakran jelentősek. Ilyen például a talajvíz elvezetése (pl. városfejlesztés céljából) és a talajvíz vagy a szénhidrogén felszín alóli kitermelése.

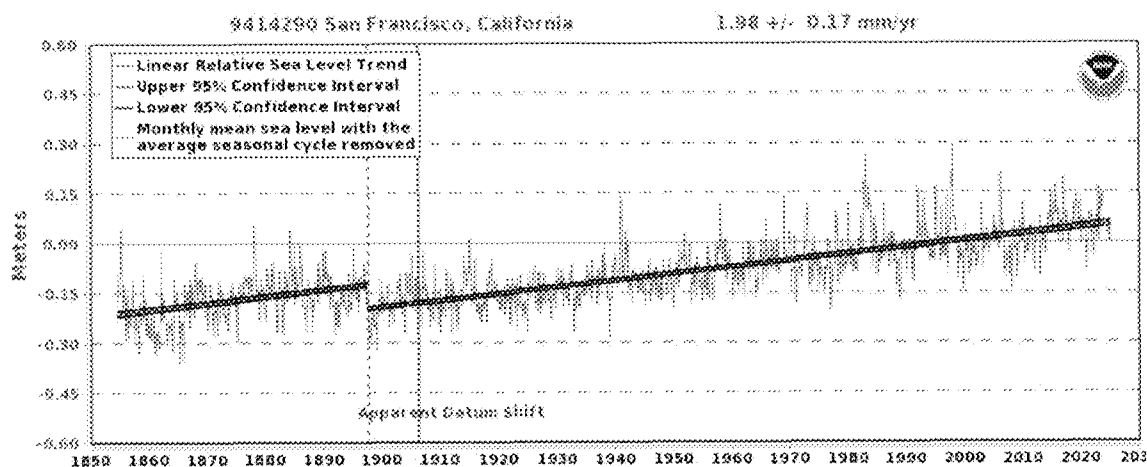
A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést (ASLR) mutatja olyan kiválasztott helyszíneken, amelyeket a korrigálatlan relatív tengerszint-emelkedés (RSLR) összegéből - mareográf idősorokból (NOAA, 2025) és a függőleges szárazföldi mozgás (VLM) méréseiből (NAS, 2012; Letetrel et al., 2015; Karegar et al., 2016) becsülve. – határoztak meg. Ezen helyszínek mindegyikén az abszolút tengerszint-emelkedés a helyi süllyedés miatt lényegesen kisebb, mint a mért relatív tengerszint-emelkedés. A mért relatív tengerszint-emelkedés több mint fele e helyszíneken a szárazföld süllyedésének tulajdonítható: San Francisco, Galveston, Grand Isle. Összehasonlításképpen, az abszolút tengerszint-emelkedés globális átlagos mértéke becslések szerint 0,12 hüvelyk/év.

Location	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, CA	+0.08	-0.06	+0.02
Galveston, TX	+0.26	-0.19	+0.07
Grand Isle, LA	+0.36	-0.28	+0.08
St Petersburg, FL	+0.12	-0.02	+0.10
New York City, NY	+0.11	-0.05	+0.06

7.1. táblázat: Abszolút tengerszint-emelkedés (hüvelyk/év, ASLR), amely a relatív tengerszint-emelkedésből (RSLR) és a függőleges szárazföldi mozgásból (VLM) tevődik össze.

San Francisco-öböl

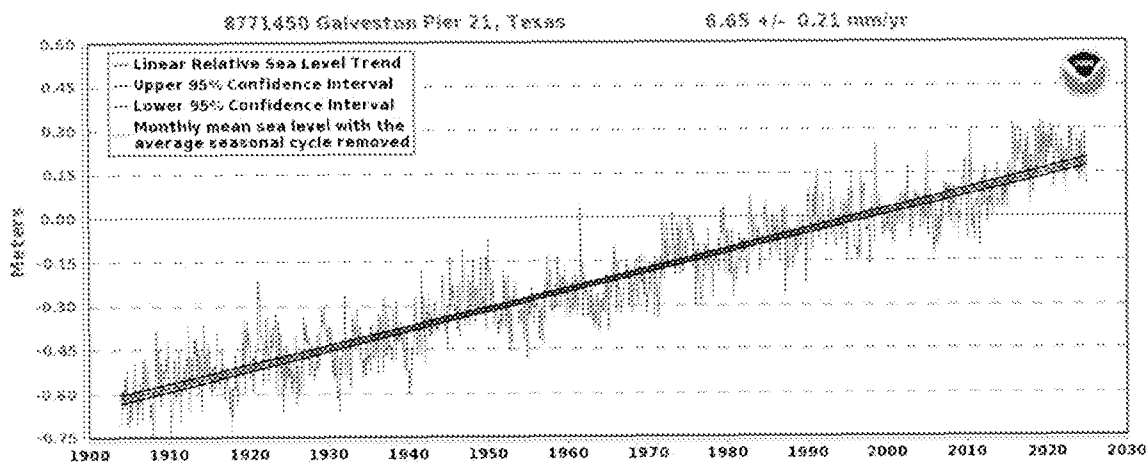
A legutóbbi évszázad során a San Francisco-öböl térségében a relatív tengerszint 7,8 hüvelykkel emelkedett, átlagosan 0,08 hüvelyk/év sebességgel (7.2. ábra). Amint a 7.1. táblázat mutatja, San Francisco függőleges szárazföldi mozgása -0,06 hüvelyk/év (süllyedés), ami a közelmúltbeli abszolút sebességet +0,02 hüvelyk/évnek adja ki. A Treasure Island, a San Francisco-i Nemzetközi Repülőtér és Foster City egyes részei akár 0,4 hüvelyk/év sebességgel is süllyednek (Shirzaei és Bürgmann, 2018). A San Francisco-öböl térségében felmerülő problémákat, beleértve a repülőteret fenyegető veszélyeket is, elsősorban a korábban vizes élőhelyekként szolgáló hulladéklerakó övezetekben fellépő talajtömörödés okozza, nem pedig a globális tengerszint-emelkedés lassú kúszása.



7.2. ábra: Mareográf-mérések San Franciscóban, Kaliforniában, a NOAA-tól neszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (letöltve: 2025.04.22.).

Galveston - Houston

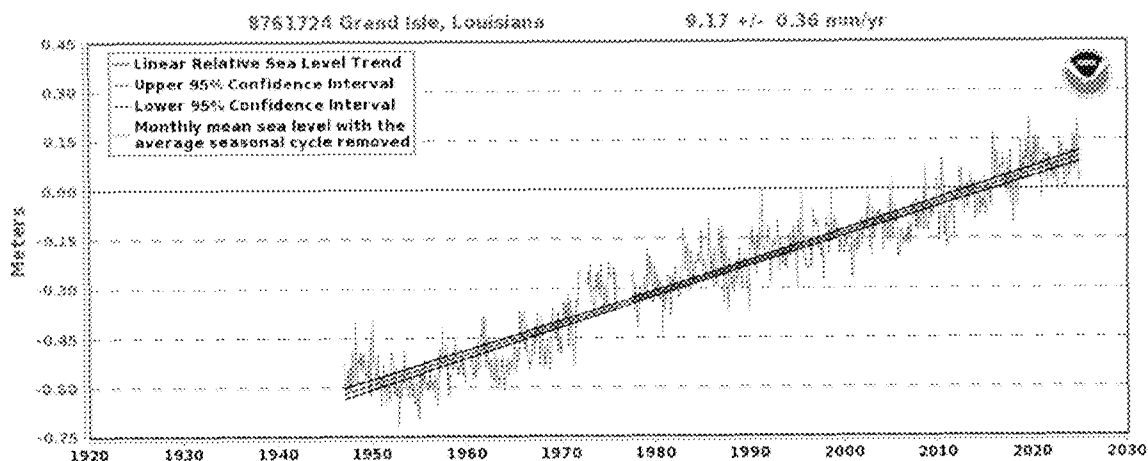
A Galveston 21-es mólónál végzett hosszú távú partmeni tengerszint-mérések (mareográf-mérések) az elmúlt évszázadban 2,18 láb tengerszint-emelkedést mutatnak, ami 0,26 hüvelyk/év sebességet jelent (7.3. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) Galvestonban -0,19 hüvelyk/évre becsülhető, ami az abszolút emelkedési sebességére +0,07 hüvelyk/év értéket ad ki (7.1. táblázat). Az Egyesült Államok Földtani Szolgálat (USGS) megállapította, hogy a Houston-Galveston régióban a szárazföldi süllyedés nagy része a talajvíz-kivonás közvetlen következménye (Kasmarek és Ramage 2017), ami a víztartó réteg üledékeinek tömörödését okozta, főként a finomszemcsés iszap- és agyagrétegekben. 1979-re Houstonban csaknem 10 lábnyi süllyedés következett be.



7.3. ábra: Mareográf-mérések a Galveston Pier-nél, Texasban, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (letöltve: 2025.04.22.).

New Orleans és a Mississippi-delta

A louisianai Grand Isle-ben végzett hosszú távú mareográf-mérések azt mutatják, hogy a tengerszint az elmúlt 100 évben valamivel több, mint 3 lábbal emelkedett, átlagosan 0,36 hüvelyk/év sebességgel (7.4. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) becslések szerint -0,28 hüvelyk/év. A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést +0,08 hüvelyk/évnek adja meg.

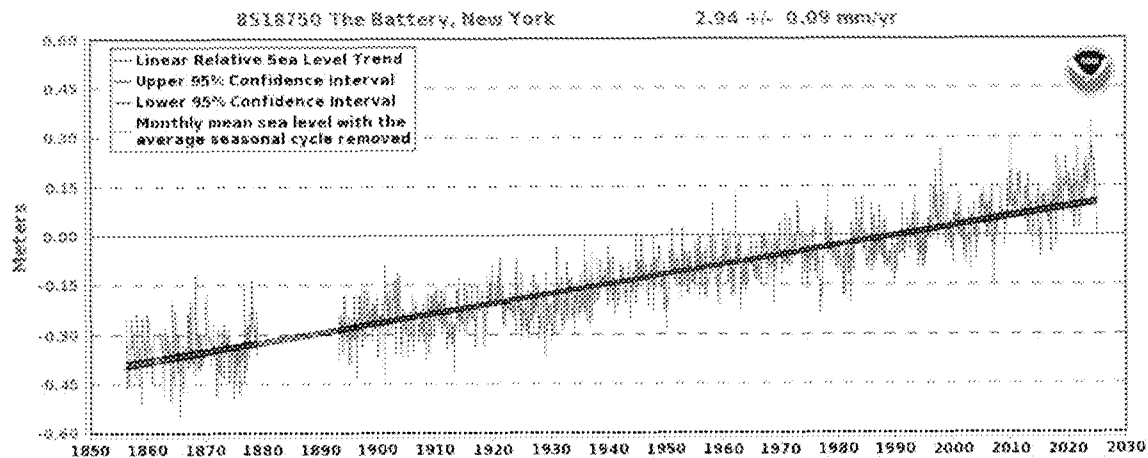


7.4. ábra: Mareográf-mérések Grand Isle-ben, Louisianában, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (letöltve: 2025.04.22.).

A Mississippi-delta régióban a tengerszint emelkedésének és a földveszteségnek a problémái összetettek. A fő okok: geológiai süllyedés és a Mississippi folyó által szállított üledék mennyiségének csökkenése. Az 1950-es évek óta a medencében épült gátak körülbelül 50 százalékkal csökkentették a Mississippi lebegő üledékterhelését (Maloney 2018). Louisiana partvidékének új süllyedési térképe szerint a part menti régió évente körülbelül 30 centiméterrel süllyed (Neinhuis et al. 2017), ami a talajvíz és az erőforrások kimerülésével jár. Mivel a város átlagos tengerszint feletti magassága 30-60 centiméterrel a tengerszint *alatt* van, az antropogén felmelegedésből eredő tengerszint-emelkedés aligha tekinthető a New Orleans-i problémák fő okának.

New York City

New York City különösen ki van téve a tengerszint-emelkedés hatásainak, mivel elsősorban szigeteken épült, és 830 kilométer hosszú partvonallal rendelkezik. Manhattan déli csücskében (The Battery) végzett mareográf-mérések azt mutatják, hogy a relatív tengerszint az elmúlt évszázadban több mint 28 cm-rel emelkedett, átlagosan 0,38 cm/év sebességgel (7.5. ábra). New York City területén azonban a függőleges szárazföldi mozgás -0,05 cm/év (nagyjából 12 cm/év), így a tengerszint abszolút emelkedésének mértéke a The Battery-nél 0,06 cm/év, ami a mért relatív tengerszint-emelkedés körülbelül 55 százaléka.



7.5. ábra: Mareográf-mérések The Battery-nél, New York államban; az adatok a NOAA-tól származnak - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (letöltve: 2025.04.22.).

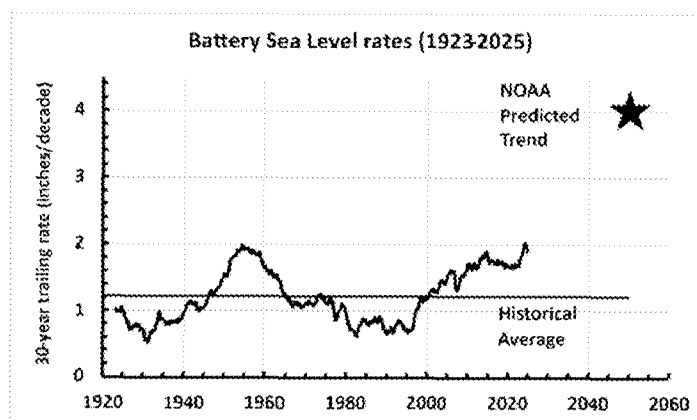
7.3 A várható tengerszint-emelkedés

A tengerszint-emelkedéssel kapcsolatos aggodalom nem az 1900 óta bekövetkezett nagyjából 20 centiméteres globális emelkedés miatt van. Hanem inkább a 21. századon át tartó melegedő éghajlat szimulációin alapuló gyorsuló emelkedésre vonatkozó előrejelzések miatt.

Az AR6 *nagyfokú* egvezést talált a 2050-re vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között, amelyek a kibocsátási forgatókönyvekre mindannyian alig érzékenyek. Csak azokat az előrejelzéseket figyelembe véve, amelyek a jégtagaró folyamatait is figyelembe veszik, és amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* van, a 2050-re vonatkozó globális tengerszint-előrejelzés az összes kibocsátási forgatókönyv szerint 3,94 és 49,9 cm közé esik (5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az 1995–2014-es alapidőszakhoz képest (Fox-Kemper et al., 2021).

Ezzel szemben az AR6 kijelenti, hogy a 2100-ra vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között *kiemértékű az egyezés*, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében. Ha csak azokat a jégtaaró-folyamatokat reprezentáló előrejelzéseket vesszük figyelembe, amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* áll fenn, az AR6 globális átlagos tengerszint-előrejelzése 2100-ra 7,9 és 39,4 hüvelyk között van (az 5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az SSP2–4,5 közepes kibocsátási forgatókönyv szerint (Fox-Kemper et al., 2021). A 2100-ig előretekinő tengerszint-emelkedésre vonatkozó előrejelzéseket nagy bizonytalanság övezi a jégtaaró instabilitásának bizonytalansága miatt, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében.

2022 februárjában a NOAA közzétette az Egyesült Államok különféle partmenti helyeire vonatkozó tengerszint-emelkedési előrejelzéseit (Sweet et al., 2022). Azt állítják, hogy 2050-re a tengerszint 30 centiméterrel fog emelkedni a manhattani The Battery-nél (2020-hoz képest). Egy 30 centiméteres emelkedés harminc év alatt több mint kétszerese lenne a jelenlegi ütemnek, és körülbelül háromszorosa az elmúlt évszázad átlagos ütemének. Ebben a történelmi kontextusban a NOAA előrejelzése figyelemre méltó – ahogy a 7.6. ábra mutatja, drámai gyorsulást igényelne, amely a 20. század eleje óta megfigyelt összes ütemtrendet meghaladja. De még ennél is figyelemreméltóbb, hogy Sweet et al. (2022) szerint ez az emelkedés „kész tény – a jövőbeli kibocsátásoktól függetlenül meg fog történni. Egy évtized múlva kiderül, hogy ennek az előrejelzésnek van-e alapja.



7.6. ábra: A tengerszint-emelkedés üteme a manhattani The Battery-nél. Az ábrán a harmincéves történelmi trend látható, valamint a NOAA által állítólágosan „kész tény”, a 2050-ig jelzett trend. Történelmi adatok: NOAA Tides and Current.

Hivatkozások

- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>
- Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers, Houston-Galveston Region, Texas (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20175080>

- Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. *Continental Shelf Research*, 111(Part A), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018>
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001>
- National Academy of Science (NAS, 2012). Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington>
- NASA. (2020). NASA sea level rise portal: 2020 edition. <https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). Sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- NOAA Tides & Currents. (n.d.). Relative sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 27(6), 28–29. <https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1>
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234>
- Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). Global and regional sea level rise scenarios for the United States (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

Fejezet-összefoglaló

Az attribúció (egy ok hozzárendelése valamely jelenséghez, „oktulajdonítás”) az éghajlatváltozás valamely megnyilvánulása okának, mindenekelőtt az antropogén tevékenységnek a beazonosítására utal. Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos vita zajlik, különösen a szélsőséges időjárási események vonatkozásában. Az okok beazonosítását megnehezíti a nagy természetes változékonyság, a várható antropogén jel viszonylag kis értéke, a jó minőségű adatok hiánya és a hiányos éghajlati modellekre való támaszkodás. Az IPCC régóta figyelmeztet arra, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló módszerek eredendően bizonytalanok, és az oktulajdonítás végső soron a szakértői megítéléstől függ.

Az IPCC a CO₂ közelmúltbeli felmelegedésben betöltött szerepéről szóló főbb értékeléseinek lényegi kritikája a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelését, a napenergia-változékonyság és az aeroszol-kényszer mérési bizonytalanságait, valamint az attribúcióhoz használt statisztikai módszerek problémáit teszi szóvá.

A szélsőséges eseményekhez kapcsolódó legtöbb éghajlati hatást kiváltó tényezőkkel kapcsolatosan az IPCC nem tesz attribúciós (oktulajdonítási) állításokat. A globális szélsőségek statisztikáival kapcsolatos állítások (pl. események valószínűsége vagy visszatérési ideje, nagysága és gyakorisága) az adatok korlátozott volta miatt általában nem tekinthetők pontosnak, és ezeket gyenge megbízhatósággal szerepeltetik. Az egyes szélsőséges időjárási események attribúciója (oktulajdonítása) az esemény ritkasága miatt ébreszt kételyt. A 2021-es északnyugat-amerikai hóhullám okaival kapcsolatos ellentmondásos állítások jól mutatják az egyes szélsőséges eseményekkel kapcsolatos elhamarkodott oktulajdonítási állítások buktatóit.

8.1 Bevezetés

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) különbséget tesz az éghajlatváltozás észlelése és az éghajlatváltozás attribúciója (okának hozzárendelése, oktulajdonítása) között. Az AR6 WGI szöveget (IPCC, 2025) meghatározása szerint:

Észlelés: A változás észlelése az a folyamat, amelynek során kimutatjuk, hogy az éghajlat vagy az éghajlat által érintett rendszer valamilyen meghatározott statisztikai értelemben megváltozott, anélkül, hogy megadnánk a változás okát. Egy beazonosított változás akkor mutatkozik meg a megfigyelésekben, ha a véletlenszerű, pusztán a belső változékonyság miatti bekövetkezés valószínűsége kicsin, például <10%.

Attribúció: Az attribúció az a folyamat, amelynek során több ok-okozati tényező relatív hozzájárulását hozzárendeljük valamely változáshoz vagy eseményhez, a megbízhatóság formális értékelésével.

Mind az észlelés, mind az attribúció statisztikai elemzésre támaszkodik. Az észlelés arra összpontosít, hogy a változások elég jelentősek-e ahhoz, hogy az októl függetlenül kiemelkedjenek a véletlenszerű változásokból. Az attribúció a megfigyelt események összehasonlítását jelenti a modell által generált ellentmondásos esetekkel. Mivel éghajlati kísérleteket nem lehetséges végezni, az attribúció statisztikai következtetést igényel annak felmérésére, hogy az emberi tevékenység (például az üvegházgáz-kibocsátás) és a természetes tényezők (például a vulkánkitörések) mennyire járulnak hozzá a megfigyelt változásokhoz. Az attribúciós módszerek feltételezik, hogy a rendszer összes külső és belső mozgatórugója ismert és jelen van.

Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos viták zajlanak, különösen azokról, amelyek szélsőséges időjárási eseményeket tulajdonítanak az éghajlatváltozásnak. Az IPCC régóta figyelmeztet, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló

módszerek eleve bizonytalanok, és a döntés végső soron a szakértői megítéléstől függ. Az AR4 I. munkacsoport (Hegerl et al., 2007) a következőképpen magyarázta ezt:

Az éghajlatváltozás okainak „hozzárendelése” az a folyamat, amelynek során meghatározott megbízhatósági szinttel megállapítjuk a kimutatott változás legvalószínűbb okait... az egyértelmű attribúcióhoz (hozzárendeléshez) az éghajlati rendszerrel ellenőrzött kísérletek elvégzésére lenne szükség. Mivel ez nem lehetséges, a gyakorlatban az antropogén klímaváltozási okutajdonítás (attribúció) alatt azt értjük, hogy egy észlelt változás „összhangban van az antropogén és természetes kényszerítő tényezők adott kombinációjára adott becsült válaszokkal”, és „nem egyeztethető össze a közelmúltbeli klímaváltozás alternatív, fizikailag hihető magyarázataival, amelyek kizárják az adott kényszerítő tényezők kombinációjának fontos elemeit” (IPCC, 2001)... A fent leírt, észlelési és attribúciós kutatásokban alkalmazott megközelítések nem tudják teljes mértékben figyelembe venni az összes bizonytalanságot, ezért végső soron szakértői megítélésre van szükség ahhoz, hogy hiteles értékelést legyen adható arról, hogy egy adott ok felelős-e egy adott klímaváltozásért.

Az AR5 II. Munkacsoport (Cramer et al., 2014) a következőt nyilatkozza:

A klímaváltozás hatásainak észlelésével (a detektálással) és hozzárendelésével (az attribúcióval) kapcsolatos két fő kihívás a megfigyelésekhez és a folyamatok megértéséhez kapcsolódik. A megfigyelési oldalon ritkák a természeti és emberi rendszerekkel, valamint az azokat befolyásoló többszörös tényezőkkel kapcsolatos kiváló minőségű, hosszú távú adatok. Ezenkívül a klímaváltozás hatásainak detektálása és hozzárendelése megköveteli azoknak a folyamatoknak a megértését, amelyek révén a klímaváltozás más tényezőkkel együtt befolyásolhatja a szóban forgó rendszert.

Az éghajlati rendszerben az ok-okozati láncok összetettsége miatt ezen kapcsolatok vizsgálata rendkívül nagy kihívást jelent.

8.2 Oktulajdonítási módszerek

A megfigyelt éghajlatváltozások okainak kiértékelésére az IPCC számos attribúciós (okutajdonítási) módszert alkalmaz, hogy elkülönítsék a természetes és az ember által okozott tényezőket. Az alábbiakban a legfontosabb IPCC attribúciós módszerek tömör leírását találjuk.

Az optimális ujjlenyomat-elemzés a megfigyelt éghajlati adatok változásainak magyarázatára lineáris regressziót használ, antropogén kényszerítő tényezők figyelembe vételével és azok nélkül futtatott éghajlati modell-szimulációk súlyozott összegeként. A regressziós modellben használt adatokat súlyozzák, hogy megpróbálják minimalizálni a véletlenszerű zaj hatását, és a becslési módszert úgy választják meg, hogy figyelembe vegye az éghajlati modell hibáját.

Az idősoros elemzés az antropogén kényszerítő tényezők és a természetes változékonyság közötti statisztikai különbségeket használja ki annak megállapítására, hogy melyik dominál a megfigyelt hőmérsékletekben, és a változások időzítésének változásait is felhasználja annak meghatározására, hogy kikövetkeztethető-e az ok-okozati összefüggés az adatsorok között.

A folyamatalapú attribúció a megfigyelt változások mögött meghúzódó fizikai mechanizmusok megértésére összpontosít. Ez a megközelítés ötvözi a megfigyeléseket, az éghajlati modelleket és az elméleti ismereteket, hogy a specifikus folyamatok változásait a kényszerítő tényezőknek lehessem tulajdonítani. Ezt a megközelítést gyakran alkalmazzák regionális éghajlati jelenségek, például monszunváltozások vagy sarkvidéki amplifikáció esetén.

A szélsőséges eseményhozzárendelés az emberi befolyás szerepét vizsgálja a szélsőséges időjárási események (pl. hőhullámok vagy aszályok) előfordulásának valószínűségében vagy intenzitásában. A módszerek a következők:

- A valószínűségi eseményhozzárendelés az éghajlati modell szimulációk nagy együtteseit használja a megfigyelt események és a modell által generált ellentmondásos (kontrafaktuális) esetek összehasonlítására.
- A történetalapú megközelítés az eseményeket előidéző fizikai folyamatokat vizsgálja, és értékeli ki, hogy az antropogén kényszerítő tényezők hogyan módosíthatták ezeket a folyamatokat.

8.3 A globális felmelegedés okutalajdonítása

A három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben a globális felmelegedéssel kapcsolatos okutalajdonítási (attribúciós, hozzárendelési) állítások a következők:

AR4: A 20. század közepe óta megfigyelt globális átlaghőmérséklet-**növekedés legnagyobb része** valószínűleg az antropogén üvegházhatású gázok koncentrációjának megfigyelt növekedésének köszönhető (IPCC 2007).

AR5: *Rendkívül valószínű*, hogy a globális átlagfelszín-hőmérséklet 1951 és 2010 között **megfigyelt emelkedésének több mint felét** az üvegházgáz-koncentráció antropogén eredetű növekedése és egyéb antropogén tényezők együttesen okozták. Az ember okozta felmelegedéshez való hozzájárulás legjobb becslése hasonló mértékű, mint az ugyanebben az időszakban megfigyelt felmelegedés. (IPCC 2013)

AR6: Az ember okozta globális felszíni hőmérséklet-emelkedés valószínűsíthető tartománya 1850–1900 és 2010–2019 között 0,8°C és 1,3°C között van, a legjobb becslés 1,07°C. Valószínű, hogy a jól kevert üvegházhatású gázok 1,0°C és 2,0°C közötti felmelegedést, egyéb emberi tényezők (főként aeroszolok) 0,0°C és 0,8°C közötti lehűlést okoztak, a természetes tényezők pedig –0,1°C és +0,1°C közötti mértékben változtatták a globális felszínhőmérsékletet, míg a belső változékonyság –0,2°C és +0,2°C közötti mértékben változtatott. Nagyon valószínű, hogy 1979 óta a troposzféria-felmelegedés fő mozgatórugói a jól kevert üvegházhatású gázok (IPCC 2021).

Az AR4 és AR5 attribúciós nyilatkozatok a 20. század közepe óta tartó felmelegedésre utalnak, arra az időszakra, amikor az üvegházgáz-kibocsátásban gyors növekedés kezdődött. A „legtöbb” és a „több mint a fele” szavak szándékosan pontatlanok, a felmelegedés 51 és 99 százaléka között mozoghatnak. E pontatlanság feltehetően a strukturális bizonytalanságok, például a természetes belső változékonyság figyelembevételét szolgálja. A megbízhatósági szint az AR4-től az AR5-re *nagyon valószínűről rendkívül valószínűre* nő. Az AR6-ban szereplő attribúciós állítás szerkezete alapvetően eltérő, a felmelegedést az 1850–1900 közötti időszakra vonatkoztatják. Az AR6 attribúciós állítása számszerűen pontosabb, bár a „valószínű” egy alacsonyabb megbízhatósági szintet jelent – az AR6 a felmelegedést lényegében teljes egészében az üvegházgáz-koncentráció emelkedésének tulajdonítja. Az AR6 leginkább magabiztos állítása az 1979 óta bekövetkezett troposzférikus felmelegedéssel kapcsolatos, a „fő mozgatórugó” és a „nagyon valószínű” szavak használatával.

Az IPCC a jelenkori felmelegedés okainak értékelésével kapcsolatban három területen kkap érdemi kritikát: a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelése, nem megfelelő statisztikai módszerek, valamint a modellek és a megfigyelések közötti jelentős eltérések. Az utóbbit az 5. fejezet tárgyalja, míg ez a fejezet az első két tényezőt veszi számba. Mindezek a kritikák a jelenkori felmelegedés IPCC-attribúciójára vonatkoznak, amelyben az IPCC még a szélsőséges események attribúcióját is alátámasztotta.

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

Az AR6 kijelenti, hogy az 1850-1900 közötti természetes külső tényezők a globális felszíni hőmérsékletet $-0,1^{\circ}\text{C}$ és $+0,1^{\circ}\text{C}$ - közötti értékben változtatták, a belső változékonyság pedig $-0,2^{\circ}\text{C}$ - és $+0,2^{\circ}\text{C}$ közötti értékben – átlagosan lényegében nem voltak semmilyen nettó hatással az 1850-1900 közötti felmelegedésre. Amint azt alább tárgyaljuk, a természetes változékonyság ezen minimális hozzájárulását számos publikáció vitatja, megkérdőjelezve a napenergia-változékonyság és a nagyléptékű óceáni cirkulációkból eredő belső változékonyság elhanyagolhatóságát

Napsugárzás-változékonyság

Az AR5 arra a következtetésre jutott, hogy az 1750–2011 közötti időszakban a teljes napsugárzás (TSI) változásai miatti sugárzási kényszer a legjobb becslés szerint nagyon csekély volt ($0,05 \text{ W/m}^2$, Myrhe et al., 2014). Az AR6 az elmúlt évszázadokra lényegesen magasabb értékeket és a TSI változás-becslésre sokkal szélesebb tartományt ismer el, kijelentve, hogy a TSI a Maunder-minimum (1645–1715) és a huszadik század második fele közötti $0,7\text{--}2,7 \text{ W/m}^2$ -rel nőtt, ez a tartomány magában foglalja mind az alacsony, mind a magas változékonyságú TSI adatkészleteket (Gulev, 2021). Az AR6-ban attribúciós vizsgálatokhoz használt CMIP6 klímamodell-szimulációkhoz ajánlott kényszerítő adatkészlet azonban két alacsony napsugárzási változékonyságú adatkészlet átlagát veszi alapul (Matthes, 2017).

Bár az AR6 lényegesen nagyobb napsugárzási hatást mutat, mint az AR5, a napsugárzás éghajlatra gyakorolt teljes hatását az antropogén kényszerhez képest továbbra is csekélynek értékelték. A napváltozások éghajlatra gyakorolt hatása azonban bizonytalan, és ma is jelentős vita tárgyát képezi (Lockwood, 2012; Connolly et al., 2021) – ami az IPCC értékelő jelentéseiben nem derül ki.

A TSI időbeli változása továbbra is kihívást jelent. 1978 óta műholdak mérik közvetlenül a TSI-t. Az adatok azonban nem elhanyagolható ellentmondásokról tanúskodnak, úgyhogy a TSI több évtizedes trendjeinek értelmezéséhez időben átfedő műhold-megfigyelések et kell egymással összehasonlítani. Számos egymással versengő összetett TSI adatkészlet létezik, amelyek között eltérés van abban, hogy az 1986–96 közötti időszakban a TSI nőtt-e vagy csökkent az (ez az ún. az ACRIM-hézag; lásd a 4. fejezetet). Továbbá a TSI műholdas adatait olyan proxy modellek kalibrálására használják, amelyek a napfoltokból és a kozmogén izotópmérésekből következtetnek a múltbeli napváltozásokra (Velasco Herrera et al., 2015).

Jelentős bizonyítékok vannak arra, hogy a 20. század második felében (1959-tel kezdődően) erős naptevékenység volt megfigyelhető, amely az 1990-es évekig terjedt, mielőtt a 21. század elején hanyatlás következett volna be; ezt az időszakot gyakran nevezik „modern maximumnak” (Chatzistergos et al., 2023; Solanki et al., 2004; Usoskin et al., 2007). Egyes kutatók azonban arra a következtetésre jutottak, hogy nem lehet teljes bizonyossággal kijelenteni, hogy a TSI több évtizedes trendje is változhat (Schmutz, 2021).

E bizonytalanság azt eredményezi, hogy a TSI egyes 1750-től kezdődő rekonstrukciói alacsony változékonyságot mutatnak (ami a napváltozások nagyon alacsony hatását sugallja a globális felszíni átlaghőmérsékletre), míg a magas TSI-változékonyságú adatsorok az iparosodás előtti idők óta a hőmérséklet-változások több mint 70 százalékát megmagyarázhatják (Scafetta, 2013; Stefani, 2021). Az elemzésben használt TSI műholdfelvételek megválasztása ezért jelentősen befolyásolhatja, hogy az éghajlatváltozást mennyiben tulajdonítják az emberi, illetve a természetes kényszereknek. Egyre több bizonyíték van arra, hogy a napsugárzás változékonyságának egyéb vonatkozásai, amelyeket közvetett napenergia hatásoknak neveznek, vagy felerősítik a TSI-kényszert, vagy a TSI-kényszertől függetlenek. Scafetta et al. (2023) szerint a napenergia éghajlatra gyakorolt hatásának ~80 százaléka nem TSI-mechanizmusokból eredhet. Számos lehetséges folyamat létezik, beleértve a Nap ultraibolya-változásait; az nagyenergiájú részecskék kicsapódását; a lélegektromos tér hatását a felhőzetre; a Nap által modulált galaktikus kozmikus sugárzás által előidézett felhőzetváltozásokat; a mágneses tér nagy relatív változásait; és a napszél erősségét. Effajta közvetett naphatásokat az éghajlati modellek nem tartalmaznak, bár a hatásuk becslésére szolgáló közvetett módszerek azt sugallják, hogy jelentősek. Az

éghajlatot befolyásoló nem TSI-mechanizmusokra vonatkozó állítások azonban bizonytalanok és vitatottak.

A nagyleptékű óceáni cirkulációk természetes változékonysága

A globális felszínhőmérséklet átlagos változásai összefüggenek az óceáni cirkulációs minták visszatérő nagyleptékű váltoásaival, beleértve az Atlanti-óceán több évtizedes oszcillációját (AMO), a Csendes-óceán évtizedes oszcillációját (PDO), valamint az El Niño-Déli oszcillációt (ENSO). Ezek a cirkulációk befolyásolják az óceán hőfelvételét és hőeloszlását, valamint a légköri cirkulációs mintákat és a felhőeloszlást. Vita folyik arról, hogy ezek a változások szigorúan az éghajlati rendszer belső tényezői-e, vagy lehet-e nap-/csillagászati eredetű, esetleg befolyásolhatják-e nagy vulkánkitörések.

Bár az éghajlati modellek szimulálják a nagyleptékű óceáni cirkulációkat és a belső éghajlati változékonyságot, a legtöbb modell a több évtizedre visszamenő megfigyelésekhez képest túl kicsi amplitúdót mutat, és a modellnek a megfigyelt éghajlattal való együttes változása fokozatosan eltűnik (Kravtsov et al. 2024). Több szimuláció átlagolása hatékonyan átlagolja a belső változásokat, és csak a kényszerített éghajlati változékonyságot hagyja meg (pl. CO₂-kényszerítés). Mivel a jelenkori felmelegedés nagy része az 1970-es évek végén kezdődött, a mostani 50 éves felmelegedés időleptékben ugyanaz, mint az AMO és a PDO több évtizedes oszcillációi.

Az AR5 és AR6 jelentések összefoglaló megállapításai:

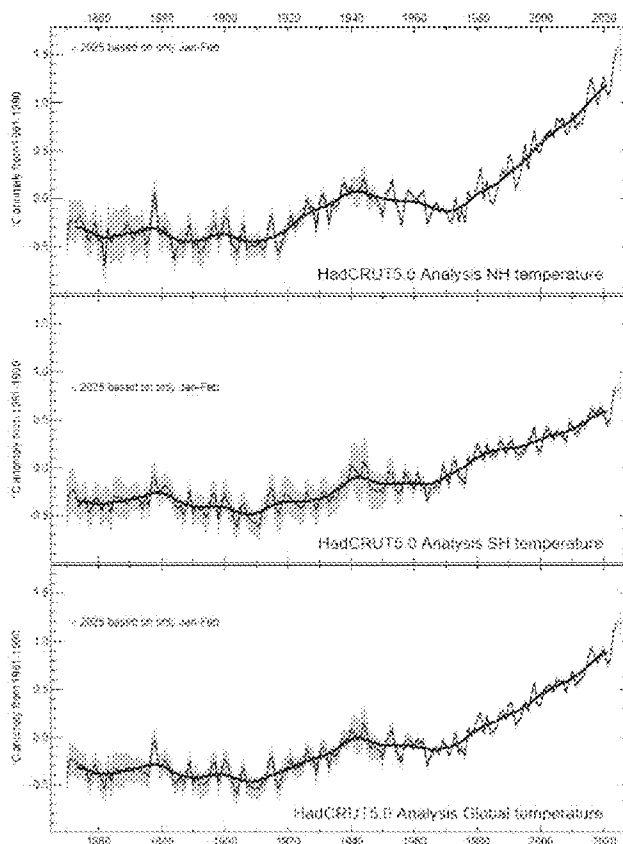
AR5: A Csendes-óceán évtizedes változékonysága, amely a PDO-hoz vagy az IPO-hoz kapcsolódik [IPO: évtizedek közötti - interdekadós - csendes-óceáni oszcilláció], jelentősen hozzájárul a regionális és globális hőmérsékleti trendekhez, de a belső változékonyság és a külső kényszer relatív hozzájárulását nehéz a CMIP5 szimulációkban szétválasztani.

AR6: Az AR5 óta egyre jobban megértjük a belső változékonyság, például az ENSO, a PDO és az AMO szerepét a regionális éghajlati trendek modulálásában. Azonban ezen módusok pontos időzítésével és amplitúdójának szimulációjával kapcsolatos CMIP6 modellkorlátok következtében (is) a megfigyelt változások antropogén kényszernek való tulajdonítása bizonytalan (*nagy megbízhatóságú megállapítás*).

A több évtizedes oszcillációk globális hőmérsékletre gyakorolt csúcspont-mélypont hatásának amplitúdóját az IPCC AR6 a következőképpen értékelte: „A belső változékonyság miatti változás valószínűsíthető tartománya -0,2°C és +0,2°C között van (IPCC, 2021).” Ez 0,4°C-os mélypont-csúcspont változást jelent. Évszázadokon keresztül globális hőmérséklet-változások folyamán a mélypontok és a csúcspontok hatása kioltódnak, és a nettó hatás csekély vagy nulla.

Az olyan oszcillációk esetében azonban, mint az AMO és a PDO, a csúcspontok és mélypontok időzítése összetéveszthető az évszázados trenddel. E kérdés az elmúlt 50 év felmelegedésének oktulajdonításában (amikor a közelmúltbeli felmelegedés nagy része bekövetkezett) nagyon fontosá válik. Még ha a klímamodellek a több évtizedes oszcillációk helyes amplitúdójával is rendelkeznek, a csúcspontok és mélypontok időzítése nincs megfelelően szimulálva, mivel minden modell és az egyes együttesek eltérő fázisokat szimulálnak. Miután a modellgyűttes tagjainak és a különféle modelleknek a szimulációit átlagolták, a természetes belső változékonyság hozzájárulása a fáziskülönbségek miatt kiátlagolódik, ami a természetes belső változékonyság szerepét az attribúciós folyamatban gyakorlatilag kioltja.

A globális felszínhőmérséklet-anomáliák 1850 óta tartó idősorai (8.1. ábra) egy általános felmelegedést mutató trendhez hozzáadódóan jelentős amplitúdójú szabálytalan változásokat mutatnak, és 1976 után az északi és a déli félteke közötti trendben markáns különbség alakul ki. Az 1905-1945 közötti időszak erős felmelegedési tendenciát mutatott. A következő 30 évben, 1945-1976 között, enyhén csökkenő hőmérsékleteket tapasztaltak. A legutóbbi felmelegedési időszak 1977-ben kezdődött.



8.1. ábra: A globális átlagos felszínhőmérséklet-anómia 1850–2025 között. Fent: Északi félteke. Középen: Déli félteke. Alul: Globális átlag. Forrás: UK Hadley Centre
<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

A 20. század eleji felmelegedés okait Hegerl et al. (2017; 2019) tárgyalja. A légköri CO₂-koncentráció 298 ppm-ről (1905) 310 ppm-re (1941) nőtt, ami arra utal, hogy a CO₂-nek csekély volt a hatása. A vulkáni aktivitás ebben az időszakban nagyon alacsony szintű volt, a napenergia-kényszer pedig bizonytalan. Hegerl et al. (2017) valamilyen módon mégis arra következtetett, hogy ennek a felmelegedésnek a 40-54 százaléka külső kényszernek tulajdonítható, a többi pedig belső változékonyságnak. Bronniman et al. (2024) a 20. század első évtizedében a déli féltekén bekövetkezett lehülés okaira összpontosított. Megállapította, hogy a lehülés a Csendes-óceán La-Niña-szerű mintázatahoz, egy hűvös trópusi és szubtrópusi Dél-Atlanti-óceánhoz, egy hideg extratrópusi Dél-Csendes-óceánhoz és hűvös déli közepes szélességi körökön található szárazföldi területekhez kapcsolódott. A Déli Gyűrűs Módus (SAM) pozitív volt, erősödött az Amundsen-Bellingshausen-tengerek alacsony értékével, bár az adattermékek szórása jelentős.

Az 1930-as évek felmelegedése és az azt követő lehülés a század közepén különösen hangsúlyos volt az Arktiszon. Bokuchava és Semenov (2021) megállapították, hogy ezeket a változásokat valószínűleg az Észak-Atlanti-óceán és az Észak-Csendes-óceán hosszú távú természetes éghajlati változásainak együttes hatása okozta, hozzájárulva a lecsökkent vulkáni aktivitáshoz és a naptevékenység változásaihoz kapcsolódó természetes sugárzási kényszerhez, valamint a emelkedő üvegházgáz-koncentrációhoz. Tokinaga et al. (2017) kimutatta, hogy a 20. század elején a belsőleg generált csendes-óceáni és atlanti interdekádos (évtizedek közötti) változékonyság együttes hatása fokozta az Arktisz felmelegedését. A szinkronizált csendes-óceáni-atlanti felmelegedés drasztikusan megváltoztatja a bolygóméretű cirkulációkat az északi féltekén; ugyanezek a cirkulációs minták globális hatással is bírnak.

Az 1945 és 1976 közötti lehülési időszakot „nagy szünetnek” nevezik. Számos okot feltételeztek: a csendes-óceáni évtizedes oszcillációval és az atlanti több évtizedes oszcillációval összefüggő ingadozásokból eredő természetes belső változékonyságot; az ipari tevékenységekből származó aeroszolkibocsátás növekedése miatti lehülést; megnövekedett hőfelvételt az Atlanti-óceánban, a Déli-óceánban és az Egyenlítői-óceánban. Thompson et al. (2010) azt állapította meg, hogy a huszadik század közepén a két félteke hőmérsékleti trendjei közötti különbség nagyrészt az északi félteke tengerfelszín-hőmérsékletének 1968 és 1972 közötti gyors, körülbelül 0,3 °C-os csökkenésének tudható be.

Az 1976-1977-es nagy csendes-óceáni éghajlatváltozás egy figyelemre méltó éghajlati esemény volt. Ezt az északi Csendes-óceán légkör-óceán rendszerének hirtelen változása jellemezte, ami kölcsönhatásba lépett a globális éghajlati mintázatokkal. Ez az eltolódás szorosan összefügg a Csendes-óceáni Évtizedes Oszcillációval (PDO), amely évtizedek leforgása alatt oszcillál a meleg és a hideg fázisok között. Az 1976-os eltolódás átmenetet jelentett egy túlnyomórészt negatív (hideg) PDO fázisból (1947–1976) egy pozitív (meleg) fázisba (1977-től 2000-ig), jelentős következményekkel járva a globális és regionális éghajlati mintázatokra, beleértve az El Niño és a La Niña események gyakoriságát is. A Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást (GPCS) egybeesett a felgyorsult globális felmelegedés időszakának kezdetével. Ha a Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást figyelembe vesszük az 1950 óta végzett éghajlati attribúciós elemzésekben, a 20. század második felében bekövetkezett felmelegedés 40 százalékát vagy annál többet a természetes belső változékonyságnak tulajdonítanak (McLean et al., 2009; Tung és Zhou, 2013; Chylek et al., 2016; Scafetta, 2021).

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

Az optimális ujjenyomatvétel egy Allen és Tett (1999) által bevezetett statisztikai technika, amelyben a megfigyelt éghajlati adatokat éghajlati modell szimulációkkal hasonlítják össze abból a célból, hogy azonosítsák az emberi vagy természetes kényszerekhez kapcsolódó mintázatokkal (vagy „ujjenyomatokkal”). A módszer magában foglalja az észlelt éghajlati változások egy vektorának – például a világ különféle pontjain mért felmelegedési ütemeknek – együttes figyelembe vételét, és súlyozott összegű „jelek” -re való bontását, hogy a különböző típusú kényszerekkel rendelkező éghajlati modellek által generált modellmegfigyelésekkel azonos eredményt kapjanak. A súlyokat a Teljes Legkisebb Négyzetek Elmélete (TLS) nevű regressziós módszerrel választják ki. Az elemzés általában csak két jelet használ, az egyiket csak antropogén kényszereket használó modellek, a másikat pedig csak természetes kényszereket használó modellek generálják. Ha a jelhez tartozó becsült súlyozási együttható szignifikánsan eltér nullától, akkor a jelet „észleltnek” nevezik. Ha közel van 1-hez, akkor a jelet generáló modellt konzisztensnek mondják a megfigyelésekkel. Ha kisebb, mint 1, akkor az adott kényszer modellje túl erős, és csökkenteni kell, illetve fordítva. Mind a megfigyelt adatokat, mind a jeleket az éghajlati rendszer véletlenszerűségeinek modell által generált becslésével súlyozzák, hogy maximális súlyt adjanak azoknak a régióknak, ahol a természetes változékonyság minimális.

Az optimális ujjenyomat-készítés az attribúciós kutatási szakirodalom elsődleges eszköze. Bár az IPCC 2001 óta széles körben használja és kiemelten kezeli, nagyon kevés szakirodalom vizsgálja az általa generált eredmények statisztikai tulajdonságait. Az egyik eredendő gyengesége az, hogy az eredmények az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezésektől függenek, különösen a természetes változékonyság ábrázolását illetően (IPCC AR5 10.2.3. fejezet).

McKitrick tanulmánysorozata (McKitrick 2021, 2022, 2023, 2025) megkérdőjelezte az optimális ujjenyomat-készítési módszert, azzal érvelve, hogy az eredendően megbízhatatlan, és hogy az ökonometriából átvett gyakorlatok érvényesebb eredményeket adhatnak. A statisztikai elmélet megköveteli, hogy a regressziós modellek torzítatlan együtthatókat szolgáltatassanak, ez esetben teljesül a Gauss-Markov feltételeknek nevezett feltételezési halmaz. McKitrick (2021) azzal érvelt, hogy az Allen és Tett (1999) módszertan sérti a Gauss-Markov feltételeket, ami potenciálisan torzított és inkonzisztens ujjenyomat-együtthatókhoz vezet, aláásva a módszer megbízhatóságát. Chen et al. (2023) megerősítették ezt az elemzést, bár azzal érveltek, hogy a módszer nagyon szigorú

feltételezések mellett jó eredményeket hozhat. McKitrick (2022) és (2023) további aggodalmakat is megemlített, ugyanis a klímakutatók – a tudományos diszciplínák között gyakorlatilag egyedülként – TLS-t használtak antropogén üvegházhatású gázok jel-együtthatóinak becslésére, annak ellenére, hogy annak a tendenciája instabil, ha csak nem áll fenn néhány olyan erős feltételezés, amelyek teljesülése a gyakorlatban nagy valószínűséggel lehetetlen. Az optimális ujjlenyomatvétel során a szokásosan felmerülő körülmények között a TLS-becslések nagy pozitív torzítást hordoznak magukban. Így minden olyan tanulmány, amely optimális ujjlenyomatvételhez anélkül használt TLS-t, hogy ellenőrizte volna annak alkalmazhatóságát az adott adatkörnyezetben, valószínűleg túlbecsülte az attribúciót.

McKitrick (2025) empirikus példát mutatott be a hagyományos optimális ujjlenyomatvétel eredményeinek és a mainstream ökonometriából származó módszereknek az összehasonlításáról. Az utóbbiakról ismert, hogy specifikus alkalmazások egyikeként jeldetektálásra is alkalmasak. Míg az IPCC optimális ujjlenyomatvételi módszere egy 1900 és 2010 közötti globális hőmérsékleti adathalmazon közel 1,0-es antropogén jel-együtthatót eredményez, a konzisztens módszer körülbelül 0,4-es együtthatót eredményez, amely az 1980 és 2010 közötti adatokon körülbelül 0,65-re emelkedik, ami azt jelenti, hogy az üvegházhatású gázokra adott modellválaszt körülbelül a felére kell csökkenteni, hogy optimálisan illeszkedjen a megfigyelésekhez. Ezzel szemben a természetes kényszerítő jel együtthatója 2,0 és 4,0 között van, ami azt jelenti, hogy a természetes kényszerítő éghajlati modelleket két-négyszeresére kell felszorozni, hogy megfeleljenek a megfigyelt éghajlatváltozásnak. A McKitrick (2025) által becsült ujjlenyomat-együtthatók, amikor az adatkészletben azokat a kényszerítő jelek generálására használt klímamodellek átlagos érzékenységeinek skálázására használják, 1,4°C-os átmeneti klímaérzékenységet mutatnak. Ez az érték összhangban van Lewis (2023) becslésével, amely egy másik becslési módszert és több független adatkészletet használ.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az az alap, amiről kiindulva az optimális ujjlenyomat-módszert sokáig megbízhatónak tekintették, rossz. Annak meghatározásához, hogy mely eredmények statisztikailag robusztusak, a korábbi eredmények egyenkénti újrvizsgálatára lenne szükség.

8.3.3 Idősoros módszerek

Az IPCC (AR5 WGI 10.2.2) felfigyelt az oksági összefüggések értékelésének az idősoros ökonometria szakirodalmából felmerült alternatív megközelítéseire. Ezeknek az az előnyük, hogy nem az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezéseken alapulnak, hátrányuk viszont, hogy függenek az éghajlati és kényszerítő adatok mögött meghúzódó adatgeneráló folyamattal kapcsolatos, nehezen tesztelhető feltételezésektől. A ma klímaökonometriának nevezett módszerek olyasféle eszközöket használnak, mint egységgyök-tesztelés, Granger-okszági analízis és kointegrációs analízis. Ezeknek mindegyike ismerős a közgazdaságtanból és a pénzügyekből, és lassan alkalmazásra kerülnek a klímatudományban is. Az idősoros elemzési módszerek lehetőséget kínálnak annak meghatározására, hogy a klímaváltozás elsődleges mozgatórugói antropogén vagy természetes tényezők-e, anélkül, hogy klímamodelleket kellene használni, bár kulcsfontosságú kérdések továbbra is tisztázatlanok (pl. Dergiades et al., 2016, Balcombe et al., 2019, Dagsvik et al., 2020, Razzak, 2022, Dagsvik és Moen, 2023).

A „Granger-okszági” modellezés az együtt mozgó adatsorok befolyásolási irányainak meghatározására alkalmas eszköz. Ez egy statisztikai fogalom, nem fizikai. Ha egy változó aktuális értékének ismerete jelentősen javítja egy másik változó előrejelzésének pontosságát, ebből oksági összefüggésre következtethetünk; ezt Granger-okszági viszonynak nevezzük. A modellezőeszközök, az úgynevezett vektor autoregresszió, közvetlen impulzus-válasz mintázatokat és visszacsatolásokat mér. A jól ismert Vosztko jégmagadatokra történő alkalmazás hibát tárt fel Al Gore *Kellemetlen igazság* című dokumentumfilmjében. Gore bemutatta az adatokat, és felhívta a figyelmet a hőmérséklet és a CO₂ változás közötti koherenciára egy 440 000 éves időszak folyamán, amelyről Gore azt állította, hogy a hőmérséklet-változásokat a CO₂ okozza. A hőmérséklet-változások azonban befolyásolhatják a légköri CO₂-szintet. Davidson et al. (2015) megvizsgálta az idősorokat, és az derült ki, hogy a CO₂-

nek Granger-oka hőmérséklet, de fordítva ne is áll fenn. Más szóval, a Vosztok-adatokban ábrázolt időléptékekben a sorozat koherenciája elsősorban a hőmérséklet CO₂-szintre gyakorolt hatásának a következménye, nem pedig a CO₂-szint hőmérsékletre gyakorolt visszacsatolása.

Összefoglalva, az éghajlati adatok ok-okozati összefüggéseinek két elsődleges statisztikai módszerei: az optimális ujjenyomatvétel és az idősoros elemzés. Az attribúciós szakirodalomban Allen és Tett (1999) optimális ujjenyomatvételi módszerének alkalmazásai dominálnak, és ezzel alátámaszthatók voltak a korábbi IPCC-következtetések. Az eredmények azonban függenek az éghajlati modellek pontosságától, és a módszer közelmúltbeli bírálatok szerint „eredendően elfogult”. Az idősoros módszerek nem függenek az éghajlati modellektől, de saját feltételezéseket igényelnek, és olyan eredményeket generáltak, amelyek eddig egyáltalán nem konvergáltak konszenzus felé.

8.4 Csökkenő bolygóalbedő és a legutóbbi rekordmelegedés

A globális átlaghőmérséklet hirtelen emelkedése előtérbe állította az éghajlat rövid távú mozgatórugóinak kérdését. Az egyik ilyen jelölt az elnyelt napsugárzás aránya, amely az elmúlt években szintén hirtelen megnőtt. A kérdés az, hogy a változás az üvegházgázok okozta felmelegedés belső visszacsatolása-e, vagy valami más növelte az elnyelt sugárzás arányát, amely aztán a közelmúltbeli felmelegedést okozta.

A bolygóalbedő a bejövő napsugárzás azon részaránya, amely visszaverődik az űrbe, ahelyett, hogy azt a bolygó elnyelné. E tekintetben az erősen fényvisszaverő felületek: a felhők teteje, valamint a hó és a jég a legfontosabbak. A Föld albedója körülbelül 30 százalék, ami azt jelenti, hogy a Földet elérő napfény közel egyharmada közvetlenül visszaverődik az űrbe. Az alacsonyabb albedó azt jelenti, hogy a bolygó több napenergiát nyel el, amit aztán hőként sugároz vissza. Ezért, ha minden más tényező változatlan, a bolygó albedójának csökkenése a Föld felmelegedésével jár.

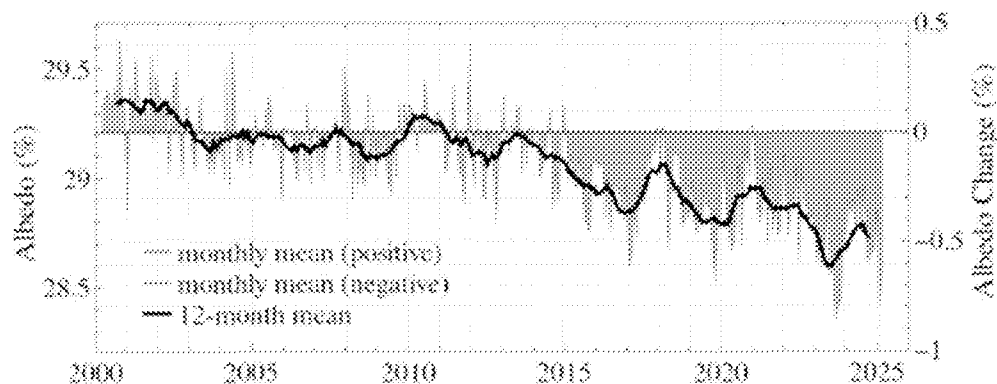
A Föld éghajlati rendszerében vitathatatlanul a legszembetűnőbb 21. század változás, hogy a bolygó albedója 2015 óta jelentősen csökkent, amely folyamat legalább két éven át egybeesett a rekordot elérő globális melegedés időszakával. A 8.2. ábra a bolygó albedójának 2000 óta bekövetkezett változásait mutatja. (Jó műholdas megfigyelések 2000 óta vannak). A bolygó albedójának 0,5 százalékos csökkenése 2015 óta az átlagosan elnyelt napsugárzásban 1,7 W/m²-es növekedésnek felel meg (Hansen és Karecha, 2025). Összehasonlításképpen, Forster et al. (2024) becslése szerint a légköri CO₂-koncentráció az iparosodás előtti időkhöz viszonyított növekedéséből adódó jelenlegi kényszerérték 2,33 W/m².

A 2000 előtti, kevésbé megfelelő adatokkal rendelkező időszakra visszatekintve Goessling et al. (2025) értékelése szerint a bolygó albedója viszonylag alacsony volt az 1940-es és 50-es évek körül, mielőtt az ipari aeroszol prekursor kibocsátásának növekedése az 1980-as évekig megnövelte volna az albedót. A legnagyobb bolygóalbedó-eltéréseket a vulkánkitörések okozta magas albedójú epizódok okozták, például az 1991-es Pinatubo-kitörés után. Bár bizonytalan, de lehetséges, hogy a 2023-as bolygóalbedó-albedominimum volt legalább 1940 óta a legalacsonyabb albedóérték.

A felszíni jellemzők változásai nem magyarázzák a bolygóalbedó 2015 óta bekövetkezett csökkenését:

- Az északi-sarki tengeri jég kiterjedése 1980 óta körülbelül 5 százalékkal csökkent (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), bár 2007 után az északi-sarki tengeri jég csökkenése szünetelt (England et al., 2025)
- Az antarktiszi tengeri jéggel kapcsolatban az IPCC AR6 arra a következtetésre jut, hogy „1979 és 2020 között az antarktiszi tengeri jég területén a regionálisan ellentétes trendek és a nagy belső változékonyság miatt nem volt jelentős tendencia.” (Összefoglaló a döntéshozók számára, A.1.5)
- Az északi féltekén az éves hótakaró 1967 óta lassan csökken, jelentősnek nem nevezhető tendenciával. Az adatok szerint az északi féltekén havasabb telek vannak, amelyeket tavasszal és nyáron gyorsabb olvadás kísér, lásd: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/> és 5.6. szakasz

- A globális zöldülés (2. fejezet) hozzájárul a bolygó albedójának csökkenéséhez, mivel az erdők albedója alacsonyabb, mint a nyílt területeké vagy a hóé. Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy az erdők megnövelik a felhőzetet (ami erős fényvisszaverő képességet jelent), és ez ellensúlyozza az erdőterület növekedésével járó közvetlen albedócsökkenést.



8.2. ábra: A Föld albedója (fényvisszaverő-képesség, százalékban) , az évszakok hatásának eltüntetésével Forrás: Hansen és Karecha (2025)

A felszíni fényvisszaverő képesség változásai hozzájárulnak a bolygó albedójának kismértékű, lassú csökkenéséhez. Ezek a változások azonban nem magyarázzák a bolygó albedójának 2015-ben kezdődő meredek csökkenését. Továbbá a felszíni albedó bármilyen változása átlagosan körülbelül háromszoros faktorral csillapodik, mindenekelőtt a felhőtakaró miatt (Loeb et al. 2019). A felszín albedóváltozása így csak gyenge hozzájárulást jelent a közelmúltbeli bolygóléptékű albedócsökkenésben, különösen ami az éves átlagot és a globális értéket illeti. Ezért a legvalószínűbb magyarázatot a meredek albedócsökkenésre a légköri aeroszokok és/vagy a felhők változásai adják.

Az aeroszokok a légkörben található apró részecskék, amelyek visszaverik a napfényt, és kölcsönhatásba léphetnek a felhőfolyamatokkal, hogy a felhők fényvisszaverőbbek legyenek. Az aeroszokok lehetnek természetes eredetűek (pl. talajból, tüzekből származó por), valamint emberi eredetűek: égetésből származók (beleértve a fosszilis tüzelőanyagokat is). Azok a régiók, amelyek zöldülnek és/vagy ahol megnő a csapadékmennyiség, kevesebb port termelhetnek. Az antropogén aeroszokok esetében három szakaszban, 2010-ben, 2015-ben és 2020-ban vezettek be új, a kénkibocsátás csökkentését célzó hajóüzemanyag-szabályozást. A szulfátrészecskék visszaverik a napsugárzást, így a tisztább levegő azt jelenti, hogy kevesebb napsugárzás verődik vissza, ami hozzájárul a felszín felmelegedéséhez. A szulfátaeroszokok közvetett hatásai közé tartozik, hogy a szubtrópusokon megnő az alacsonyszintű felhők fényvisszaverő képessége. Vita övezi, hogy a szulfátkibocsátás változása mennyire jelentős a Föld sugárzási egyensúlyában (Hodnebrog et al., 2024; Yuan et al., 2024), de a főbb hajózási útvonalakra bevezetett korlátozás kismértékű globális hatásra utal (Schmidt, 2024).

A globális albedó 2015 óta tartó csökkenésére mindenekelőtt a felhők változásai adhatnak magyarázatot. A felhők tulajdonságainak közelmúltbeli változásaival két újabb tanulmány (Loeb et al., 2024; Goessling et al., 2024) is foglalkozott. Műholdas és újrafeldolgozási adatok figyelembevételével Loeb et al. megállapította, hogy az északi féltekén a bolygóalbedó csökkenésének fő oka az alacsony és a közepes szintű felhők 2015 óta tartó csökkenése, míg a déli féltekén a bolygóalbedó csökkenése elsősorban a közepes szintű felhők csökkenésének tudható be az összes földrajzi szélességi zónában. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a felhőanomáliák főként az alacsonyszintű felhők csökkenésének tudhatók be. Az elmúlt évtizedben koherens alacsonyszintű

felhőzet-csökkenéssel rendelkező régiók közé tartozik az Óceánia (Gél-kelet-Ázsia, „Maritime Continent”) körüli meleg medence régió és az északi extratropusi nyugati Csendes-óceán, valamint az Atlanti-óceán és a szomszédos szárazföldi régiók nagy része. Az ezekben az elemzésekben 2015 óta azonosított globális felhőzet-csökkenés 1-2 százalékos.

A kérdés ezt követően az, hogy vajon mi a felhőzetváltozás oka. Az elmúlt évtizedben a csökkenő felhőzetre két magyarázat született:

- Természetes éghajlati változékonyság
- Az alacsony szintű felhőzet változása a tengerfelszín-hőmérséklet emelkedésével van összefüggésben, ami a klímaváltozásra adott pozitív visszacsatolás kialakulására utal (Hansen és Karecha, 2025)

Nem könnyű igazolni egy 2015-ben kezdődött új pozitív alacsonyfelhőzet-visszacsatolást, mivel nincs akkoriban fellépő egyértelmű oka, ami visszacsatolást váltott volna ki. Ebben az időszakban azonban számos természetes éghajlati jel van, amely a légköri cirkuláció változásaihoz kapcsolódik, és befolyásolhatja a felhők eloszlását:

- A 2014-2016-os időszak volt az egyik legerősebb El Niño esemény, amit valaha feljegyeztek
- A 2015-ben kezdődő hideg anomália az Atlanti-óceán északi szubpoláris örvényében az óceáni cirkulációs mintázat eltolódását tükrözi, ami az Atlanti-óceán évtizedes változékonyságával jár (Frajka-Williams et al., 2017; Arthun et al. 2021).
- A Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció (PDO) pozitív indexe 2016-ban tetőzött, majd csökkent, és 2019 vége óta a negatív tartományban van.
- A tengeralatti Hunga-Tonga vulkán kitörése 2022-ben

Az El Niño Déli Oszcillációhoz (ENSO) kapcsolódó évközi felhőanomáliák jelentős globális jellel és erős regionális jellel rendelkeznek, különösen a tropusi Indiai- és Csendes-óceán felett.

A Hunga Tonga kitörése figyelemre méltó, mivel egybeesik a 2023-as kivételesen alacsony bolygóalbedó értékkel. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a 2023-as felhőperturbációk a 2015 óta megfigyelt általános mintázattól eltérő mintázatot mutattak, a felhőzetcsökkenés az északi féltekén és a tropusokon volt a legkifejezettebb. A felhőzet regionális csökkenése a legkifejezettebb az Indiai-óceán keleti részén, Dél-Amerikában és a Csendes-óceán keleti részén, valamint Észak-Amerika északi részén, a Déli-óceánon a 60° déli földrajzi szélesség körül, a szubtrópusi és keleti Észak-Atlanti-óceánban, valamint az Észak-Csendes-óceán egyes részein volt.

A Hunga Tonga kitörése szokatlan volt, mivel szulfátrészecskék mellett nagy mennyiségű vízgőz jutott a sztratoszférába. Az első publikációk a sztratoszférikus cirkulációra gyakorolt hatásokra és a közvetlen sugárzási hatásra összpontosítottak. 2025-ben olyan tanulmányok jelennek meg, amelyek a Hunga Tonga felszíni éghajlatra gyakorolt közvetett hatásait földrendszer-modellekből származó együttes szimulációk segítségével vizsgálják (Bednarz et al., 2025; Kuchar et al., 2025). E tanulmányok statisztikailag szignifikáns hatásokat találtak a regionális éghajlatra. E hatásokat a sztratoszféra-troposzféra kapcsolatokról eredő cirkulációs változások okozták. A fenti tanulmányok a vulkáni tevékenység és az éghajlati dinamika közötti összetett kölcsönhatásokra utalnak. A Hunga Tonga-kitörés bolygóalbedóra gyakorolt hatásainak kibogozásához további kutatásokra van szükség.

Összefoglalva, a bolygóalbedó csökkenése és a felhőzet egyidejű csökkenése előtérbe állítja a felhők és a felhőváltozások jelentős szerepét a globális éghajlati változékonyságban, valamint a klímaváltozásban. A globális felhőzet 1-2 százalékos változása nagyobb sugárzási hatással van az éghajlatra, mint amekkora a CO₂ megduplázódásának közvetlen sugárzási hatása. Bár nehéz kibogozni a közelmúltbeli trend okait, a csökkenő felhőzet okára vonatkozó versengő magyarázatok jelentős következményekkel járnak az egyensúlyi klímaérzékenység kiértékelése és a közelmúltbeli felmelegedés okaként való értelmezése szempontjából. További 10 évnyi adat segíthet tisztázni, hogy ez a felmelegedéssel összefüggő erős pozitív felhő-visszacsatolás-e, vagy a természetes változékonyság által vezérelt átmeneti ingadozás.

8.5 Az éghajlati hatótényezőkrevonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC (Ranasinghe et al. 2021) az „éghajlati hatások mozgatórugóit” vagy CID-eket (Climate Impact Driver) úgy határozza meg, mint „a társadalom vagy az ökoszisztémák valamely elemét befolyásoló fizikai éghajlati rendszerfeltételeket (pl. eszközök, események, szélsőségek)”. Ezért a CID-ek az időjárási és az éghajlati rendszer azon jellemzői, amelyek az éghajlatváltozás hatásainak felmérésében elsődlegesen érdekesek, mivel potenciális hatással vannak az emberekre és a természeti világra. Például a „Hő és hideg” címszó alatt a CID-eket az átlagos levegőhőmérséklet, a szélsőséges hőség, a hideg időszakok és a fagy jelenti. Az IPCC azt is kiemeli, hogy a CID-ek nem feltétlenül károsak: a szóban forgó rendszertől függően lehetnek károsak, semlegesek, előnyösek vagy mindezek kombinációi.

Ranasinghe et al. (2021, 1856. o.) 12.12. táblázatának első oszlopai, amelyeket itt 8.1. táblázatként közlünk, összefoglalják az AR6 értékelését arról, hogy vajon az összes főbb időjárási tényezőben megjelent-e az antropogén hatás jele. A fejezet egyik témája, hogy az IPCC által használt attribúciós módszerek hajlamosak túlbecsülni az antropogén hatást, és alábecsülni a természetes változékonyság szerepét. Mindazonáltal az összefoglaló táblázat egyik feltűnő jellemzője, hogy milyen kevés időjárási tényező mutat olyan antropogén jelet, amely megkülönbözteti őket a természetes változékonyságtól.

A felsorolt 33 időjárási hatáskategória közül csak ötben állítanak *nagy megbízhatósággal* antropogén jelet, további négyben pedig *közepes megbízhatósággal*. (Megjegyzendő, hogy a CID-ek egyike maga a CO₂-szint emelkedése, és mivel ezt a megnövekedett CO₂-szintnek tulajdonítani szószaporítás (autológia), e CID figyelmen kívül hagyható.) A többi esetben az IPCC nem állítja, hogy antropogén tényezőket észlelt volna. Az öt *nagy megbízhatóságú* állítás közül kettő az átlaghőmérséklet (a legköri és óceáni) változásaira vonatkozik, ezek tehát nem a szélsőséges időjárás mértékei. Továbbá a négy *közepes megbízhatóságú* állítás közül kettő az óceánkémiai összetételhez kapcsolódik, azaz szintén nem a szélsőséges időjáráshoz. Az IPCC nem tart számon emberi befolyást számos nem hőmérsékleti időjárási jellemzőben, mint például a szél, a csapadék, az árvizek vagy az aszály.

Az IPCC 12.12. táblázatának egyéb oszlopai arról számolnak be, hogy ebben az évszázadban az RCP8.5 (a legszélsőségesebb kényszerítő forgatókönyv) szerint várhatóan antropogén jelek jelennek meg. Ezeket az oszlopokat több okból is kihagytuk. Először is, mert arra vonatkoznak, hogy a klímamodellek fognak-e kimutatható jeleket kivetíteni a megfigyelésekre, ami egészen más kérdés, mint amivel itt foglalkozunk: hogy mutattak-e ki jelet a történelmi adatokban. Másodszor, ahogy a 4. fejezetben tárgyaljuk, az RCP8.5 forgatókönyv egy félrevezető és valószínűtlen, szélsőséges történet, nem „alapvető” vagy szokásos üzletmenet-előrejelzés. Harmadszor, a részletes modellek együtteséről elismerik (Palmer és Stevens 2019), hogy „nem alkalmas a célra”, azaz a regionális változások leírására, és „nem képes a jövőbeli feltételeket olyan térbeli, időbeli és valószínűségi pontossággal ábrázolni, amellyel az előrejelzéseket gyakran készítik” (Nissan et al., 2019). Ezekkel a kikötésekkel együtt is megjegyezzük, hogy az AR6 12.12. táblázatának kihagyott oszlopai azt mutatják, hogy a legtöbb időjárási hatás a század végéig várhatóan nem mutat antropogén jelet.

Amint azt a 6. fejezetben tárgyaltuk, a szélsőséges időjárási rendszerek mintázataiban a természetes változékonyság dominál, és a trendészlelésre vonatkozó leegyszerűsített állításokat gyakran ássa alá a regionális heterogenitás és a trendek időbeli megfordulása. A 8.1. táblázat arra a kapcsolódó pontra mutat rá, hogy a legtöbb szélsőséges időjárási típus változásait jelenleg nem lehet emberi hatásoknak tulajdonítani. A szelet példaként véve az IPCC azt állítja, hogy az átlagos szélsőségekben, heves szélviharokban, trópusi ciklonokban vagy homok- és porviharokban nem jelent meg antropogén jel, és még szélsőséges kibocsátási forgatókönyv esetén sem várható ilyen ebben az évszázadban. Ugyanez vonatkozik az aszályra és a tüzesetekre is.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Acidity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fire weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwaves	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Deoxygenated oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO ₂ at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease

Medium confidence of decrease

Low confidence in sign, sign of change

Medium confidence of increase

High confidence of increase

8.1. táblázat: Az IPCC AR6 I. munkacsoportjának jelentéséből a 12.12. táblázat 1. oszlopának reprodukciója. Antropogén jel megjelenése a történelmi időszakban a bemutatott CID-ek esetében. Fehér: nincs észlelt jel. Kék és narancssárga: az észlelt változás (csökkenés vagy növekedés), valamint a színes jelmagyarázatban jelzett megbízhatósági szint. A számok adott régiókra és megbízhatósági szintekre utalnak: a megjegyzéseket lásd az eredeti táblázatban.

8.6 Szélsőséges eseményekre (EEA) vonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC szélsőséges időjárási és éghajlati események attribúciója (oktulajdonítása, Extreme Event Attribution) általánosabb vizsgálata során az AR6 homályos értelmű értékelést ad az antropogén felmelegedés szerepéről, a különféle fejezetekben eltérő értelmezést szerepeltet. A WG1 11. fejezete kimondja (Seneviratne et al., 2021):

A szélsőségek megfigyelt változásainak bizonyítékai és azok emberi befolyásnak való oktulajdonítása (beleértve az üvegházhatású gázok és aeroszolok kibocsátását, valamint a földhasználat változásait) az AR5 óta megerősödött, különösen a szélsőséges csapadék, az aszályok, a trópusi ciklonok és az összetett szélsőségek (így a száraz/forró események és a tüzesetek) esetében. Néhány közelmúltbeli forró szélsőséges esemény rendkívül valószínűtlen lett volna az éghajlati rendszerre gyakorolt emberi befolyás nélkül.

Ezzel szemben, ahogy a 8.5. szakaszban is megjegyeztük, a WG1 12. fejezete (12.12. táblázat) más képet fest – feltehetően a két fejezethez tartozó különböző szerzőcsoportok szakértői eltérő következtetésekre jutottak (Ranasinghe, 2021):

- Nagy valószínűséggel növekszik a szélsőséges hőség eseményszáma a trópusi régióban, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést, és a közepes földrajzi szélességek legtöbb régiójában, valamint közepes valószínűséggel máshol.
- Közepes valószínűséggel csökken a szélsőséges hideg eseményszám Ausztráliában, Afrikában és Dél-Amerika északi részének nagy részén, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést.
- Nincs bizonyíték arra, hogy a történelmi időszakban megváltozott volna a folyók áradása, a heves csapadék, az aszály, a tüzesetek, a heves szélviharok és a trópusi ciklonok előfordulása.

Bár a szélsőséges időjárási eseményekben bekövetkező változások észlelésének és azok oktulajdonításának általános kérdése továbbra sem egyértelmű, az ezen a területen végzett tevékenységek nagy része az egyes szélsőséges időjárási események oktulajdonítására vonatkozik. A szélsőséges események oktulajdonításával kapcsolatos legnagyobb erőfeszítést a World Weather Attribution (WWA; worldweatherattribution.org), egy nemzetközi kutatási kezdeményezés fejti ki. Céljuk annak elemzése, hogy az éghajlatváltozás hogyan befolyásolja a szélsőséges időjárási események valószínűségét és intenzitását. Megközelítésük az, hogy regionális klímamodellek nagyméretű együtteseit használják fel arra, hogy összehasonlítsák a mai éghajlaton bekövetkező eseményeket egy iparosodás előtti, emberi befolyás nélküli ellentmondásos (kontrafaktuális) éghajlaton bekövetkező eseményekkel.

A WWA kiemelkedő nyilvános jelenlétet tanúsít a szélsőséges időjárás és az éghajlatváltozás közötti kapcsolat terén, sajtóközleményei a nyilvános és politikai vitákban jelentős figyelmet kapnak. A WWA lektorálatlan eredményeinek széles körű népszerűsítése, a peres eljárásokban hasznosítható elemzések alakításának nyílt elismerése, valamint módszertani kihívásai azonban vitákat váltottak ki, a kritikusok pedig megkérdőjelezzik következtetéseik megalapozottságát és pártatlanságát (Pielke Jr. 2024). Ezen problémák ellenére a WWA munkája továbbra is befolyásolja az éghajlattudományi és médiabeli narratívákat. A megközelítéssel kapcsolatos technikai kritikák közé tartozik a formális észlelési folyamat hiánya; az a hallgatóságos feltételezés, hogy az ipari forradalom utáni felmelegedés 100 százalékát üvegházhatású gázok okozzák; valamint a belső éghajlati változékonyság megfelelő figyelembevételének elmulasztása.

Mivel az EEA témaköre viszonylag új, a szakértői szakirodalomban számos alapvető módszertani kérdés még nem rendeződött. Fontos kihívást jelent az adatok hiánya. A szélsőséges események ugyanis definíció szerint ritkák. Számos, szélsőséges eseménytípust elemző vizsgálat

(beleértve az Egyesült Államok Nemzeti Értékelő Jelentéseit is) csak az 1950 vagy az 1970 óta gyűjtött adatokat értékeli. Azonban, ahogyan a 6. fejezetben is hangsúlyoztuk, az Egyesült Államok történelmének számos legsúlyosabb szélsőséges időjárási és éghajlati eseménye a 20. század első felében vagy azt megelőzően (pl. a 19. század elején) történt. És ha paleoklíma-rekonstrukciókat veszünk figyelembe, nagyon nehézé válik egy esemény számára, hogy átlépje a természetes változékonyságtól elvárható akármekkora küszöbértékeket, különösen, ha egy ésszerű méretű földrajzi régiót veszünk figyelembe.

Egy másik kihívás a vizsgált esemény meghatározása. A statisztikában és az ökonometriában régóta létezik olyan szakirodalom, amely a kiugró értékeket tartalmazó adatok elemzésének kihívásairól szól. A probléma azért merül fel, mert egy adatsor egy valószínűségi eloszlást hoz létre, amely meghatározza a megfigyelések várható tartományát. Ha kiugró értéket figyelünk meg, az arra utalhat, hogy az adateloszlást kiváltó mögöttes folyamat megváltozott (ami az időjárási kontextusban azt jelentené, hogy éghajlatváltozást észleltek), vagy hogy az mögöttes folyamatnak több állapota van, amelyek mindegyikének eltérő a valószínűségi eloszlása, ebben az esetben egy kiugró érték megfigyelése egyszerűen azt jelenti, hogy átmenetileg egy másik rállapotban voltunk, de maga a rendszer változatlan maradt. Ha egy idősor csak egyetlen kiugró eseményt tartalmaz a sorozat végén, akkor nem lehet meghatározni, hogy melyik modell a helyes (Chen és Liu 1993). Például létezhet egy „szokásos” időjárási állapot, amely egy adott tengerparti régióban a nyári nappali maximumok eloszlását eredményezi, és egy második, ún. „hőhullám”-állapot, amely akkor lép be, amikor egy szárazföldi blokkoló esemény következik be, ami 15°C-kal magasabb középhőmérséklet-eloszlást eredményez, mint az első. Egy olyan nap, amelynek hőmérséklete 13°C-kal magasabb a normálnál, vagy extrém hőanomália lenne az első állapotban, vagy némileg hűvös esemény a másodikban, és ebben az esetben statisztikai alapon nincs mód arra, hogy megtudjuk, melyik nézet a helyes.

Visser és Petersen (2012), valamint Sardeshmukh et al. (2015) is rámutatnak, hogy aegyműstől eltérő eloszlások egyformán jól illeszkedhetnek a megfigyelt adatokhoz, de egy adott időjárási esemény valószínűségére vonatkozóan nagyon eltérő következményekkel járhatnak. Visser és Petersen azzal érvelnek, hogy a szélsőséges időjárási elemzések mély bizonytalanságaira való tekintettel kerülni kell az egyes események és a globális klímaváltozás közötti összefüggés megállapítását. Továbbá, egyetlen kiugró érték léte egy adatsor végén felveti azt a problémát, hogy az események valószínűségének becslése torzított lesz, függetlenül attól, hogy a kiugró értéket befoglaljuk-e vagy sem (Barlow et al., 2020). Az torzítás kiküszöbölésére szolgáló módszereket még nem dolgozták ki, ami arra késztette egyes szakértőket (pl. Miralles és Davison 2023), hogy azt állítsák, hogy olyan helyzetekben, ahol egy adatsor egyetlen szélsőséges eseményt tartalmaz a végén, a szélsőséges esemény visszatérési időszakának becslése annyira torzított és bizonytalan lesz, hogy azt teljesen el kell kerülni. Egy esettanulmányt közlünk egy nemrégiben az Egyesült Államokban lezajlott, nagy hatású szélsőséges eseményről, hogy bemutassuk azokat a kihívásokat és kétértelműségeket, amelyekkel a szélsőséges időjárási események gyakoriságának és intenzitásának az antropogén felmelegedésnek való hozzárendelése (oktalajdonítása) jár.

8.6.1 Esettanulmány – az 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

Észak-Amerika nyugati felén 2021-ben bekövetkezett hőhullám egy szélsőséges esemény volt, amely 2021 júniusának végén a térség nagy részét érintette. Felszínhőmérséklet-rekordok dőltek meg Portlandben, Oregonban (41°C; korábbi rekord 40°C) és Seattle-ben, Washingtonban (40°C; korábbi rekord 40°C) (Mass et al., 2024).

A WWA csapata elemzésével nemzetközi címlapokra került, amely a következő attribúciós állításokat tartalmazta (WWA, 2021; Philip et al., 2022):

- Megfigyelések és modellezés alapján ennek a hőhullámnak a bekövetkezése gyakorlatilag lehetetlen lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- A becslések szerint a mai éghajlaton az esemény előfordulása körülbelül 1000 évente egy.

- Az esemény legalább 150-szer ritkább lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- E hőhullám körülbelül 2°C-kal melegebb volt, mint amilyen az ipari forradalom kezdetén lett volna (amikor a globális átlaghőmérséklet 1,2°C-kal hidegebb volt, mint ma).

Az első állítás fontos ellentmondása azonban az, hogy más kutatók a történelmi időjárási adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy bár a megfigyelt nagyságrendű hőhullám gyakorlatilag lehetetlen antropogén klímaváltozás nélkül, *természetes klímaváltozás esetén is* gyakorlatilag lehetetlen. Bercos-Hickey (2022) megjegyezte, hogy „ezek a hőmérsékletek gyakorlatilag lehetetlenek voltak bármilyen korábban tapasztalt meteorológiai körülmény között, globális felmelegedéssel vagy anélkül”. McKinnon és Simpson (2022) kijelentették, hogy „a legvalószínűbb magyarázat továbbra is az, hogy az időjárási esemény maga volt a 'balszerencse'.” A 2023-as oregoni klímaértékelés (Fleischman, 2023) arra a következtetésre jutott, hogy a hőkupola klímaváltozás nélkül is kialakult volna, és „nincs bizonyíték arra, hogy a hőkupolát előidéző időjárási jellemzők rendkívül szokatlan kombinációját a klímaváltozás valószínűbbé tette volna, továbbá a klímamodellek nem vetítik előre a magasnyomású hátságok gyakoriságának növekedését a Csendes-óceán északnyugati részén” (Fleischman, 2023, 49. o.).

Mass et al. (2024) összesítik a hőhullámhoz vezető összetett események közelítő sorrendjét. A troposzféra középső részén rekordmagasságú hátság húzódott a Csendes-óceán északnyugati térségében, amit a nyugati Csendes-óceánban zajló trópusi zavar kényszerített ki. Ez rekordmagas közép-troposzférabeli hőmérsékleteket, az alsó légkörben erős süllyedést, alacsonyszintű keleti áramlást okozott, amely a regionális terepen lefelé irányuló felmelegedést és a hűvösebb tengeri levegő eltávolítását eredményezte, valamint egy közeledő alacsony szintű vályút, amely fokozta a lefelé irányuló áramlást. Az esemény a maximális napsugárzás és a normálisnál szárazabb talajnedvesség idején történt. Egy történetiszálas megközelítést alkalmazva Mass et al. úgy értékelte, hogy a Csendes-óceán északnyugati részén nem volt megfigyelhető aszály és talajszáradási tendencia; nincs bizonyíték arra, hogy a globális felmelegedés erősebb magasnyomású gerinceket eredményezne, és nem figyeltek meg hőhullám- vagy rekordhőmérséklet-tendenciáját a régióban. Arra a következtetésre jutottak, hogy bár az antropogén felmelegedés akár 2°F-kal is hozzájárulhatott az esemény nagyságrendjéhez, kevés bizonyíték van arra, hogy az üvegházhatású gázok növekedése tovább erősítette volna az eseményt.

Bercos-Hickey et al. (2022) statisztikai elemzést végzett a hőhullám modellalapú attribúciós vizsgálatáról. Mivel az esemény nagyon kiugró érték, és messze meghaladja a történelmi adatokból illesztett általánosított szélsőérték-eloszlások határait, arra a következtetésre jutottak, hogy a visszatérési időkre, az esemény nagyságának és gyakoriságának mennyiségi változásaira, valamint a szélsőséges hőmérsékletek valószínűségére vonatkozó becslések, amelyeket a WWA szolgáltatott, nem pontosak, és alacsony megbízhatóságúnak kell értelmezni őket. Azt találták, hogy a regionális éghajlati modellek együttesét használó utólagos attribúciós módszerek, kombinálva Pearl (2009) ok-okozati következtetéseivel, korlátozott és feltételes információkat képesek szolgáltatni az emberi befolyás nagyságrendjéről erre a hőhullámra – egy szigorúbb becslést adtak, miszerint az emberi tevékenységek ~1,4–1,8 °F-os növekedést okoztak a napi maximumhőmérsékletekben.

Zeder et al. (2023) szintén arra a következtetésre jutott, hogy a Philip et al. (2022, a WWA elemzése) által alkalmazott módszerek hajlamosak eltúlozni a szélsőséges hőhullámok ritkaságát, ami a klímaváltozás hőhullám-eseményre gyakorolt hatásának elfogult észleléséhez vezet: „A megfigyelt szélsőséges hőhullám-események visszatérési időszakának túlbecslésére való hajlam azt a benyomást táplálhatja, hogy a látszólag lehetetlen hőhullám-szélsőségek jelenleg példátlan ütemben csoportosulnak.”

A 2021-es hőhullám egy ritka és példa nélküli összetett időjárási esemény volt, amely akár 9°F-kal is megdöntötte az évszázados hőmérsékleti rekordokat. Míg a WWA-csapat világszerte nyilvánosságot kapott az antropogén klímaváltozást okoló gyors állításai közzétételéhez, a későbbi

lektorált elemzések kimutatták, hogy az eseményt ritka meteorológiai körülmények okozták, amelyeket a globális felmelegedés nem tett valószínűbbé.

Hivatkozások

- Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15(6), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s003820050291>
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. *Journal of Climate*, Vol 34
- Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach.” *Management of Environmental Quality* 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.
- Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* August 2020, Pages 765–789, <https://doi.org/10.1111/rssc.12420>
- Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970>
- Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophysical Research Letters*, 49(23), e2022GL099396. <https://doi.org/10.1029/2022GL099396>
- Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*, 222, 103820
- Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>
- Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 284–297. <http://www.jstor.org/stable/2290724>
- Chen, H, SX Chen and M Mu (2023) A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. *Climate Dynamics* 62:1439-1446 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06975-5>
- Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3271–3279. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7>
- Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6), 131. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 979–1037). Cambridge University Press.

- Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023
- Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, <https://doi.org/10.1111/rssa.12557>
- Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Turasie (2015) Time series modeling of paleoclimate data *Environmetrics* 27(1) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373>
- Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. *Journal of Environmental Economics and Management* 76:67—85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911>
- England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi-decadal pause in Arctic sea ice loss. ESS Open Archive. March 29, 2025.
- Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. <https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments>
- Forster et al. (2024) “Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence” *Earth System Science Data* 17(6) <https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>
- Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Scientific Reports*, 7:11224
- Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280>
- Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>
- Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. *WIREs Climate Change*, DOI: 10.1002/wcc.522
- Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14, 123006
- Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth’s energy imbalance. *Communications Earth and Environment* 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8
- Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–881). Cambridge University Press.
- <https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity>

- Kravtsov, S., Westgate, A., & Gavrilov, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. *Climate Dynamics*, 62, 10281–10306. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4>
- Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörmann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption and the associated surface response, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 3623–3634, <https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025>.
- Lewis, Nicholas (2023) “Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence,” *Climate Dynamics* 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>.
- Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4), 503–534. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3>
- Loeb, N. G. et al. (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. *Journal of Climate* 32(16), 5003-5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1
- Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth’s Energy Budget since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757-1783
- Mass, C., et al. (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. *Weather and Forecasting*, 39(2), 275–291. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1>
- Matthes, K., et al. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKittrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. *Climate Dynamics*, 58(1–2), 405–411. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7>
- McKittrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. *Environmetrics*, 35(2), e2835. <https://doi.org/10.1002/env.2835>
- McKittrick, Ross R (2022) On the choice of TLS versus OLS in climate signal detection regression. *Climate Dynamics* 10.1007/s00382-022-06315-z
- McKittrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. *Climate Dynamics* forthcoming preprint available at www.rossmckittrick.com
- McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) “Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011637>.
- Miralles, Ophélie and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes* 41 100584 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, et al. (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wires Climate Change* 14 March 2019 <https://doi.org/10.1002/wcc.579>
- Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (49) 24390-24395 <https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Pearl, J. (2009). *Causality*. Cambridge University Press.
- Philip, S. Y., et al. (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1689–1713. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>
- Pielke Jr., Roger (2024) *Weather Attribution Alchemy*. Substack essay <https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
- Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," *Journal of Economics and Econometrics*, vol. 65(2), pages 13-47.
- Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. *Journal of Climate*, 28(23), 9166–9187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1>
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321
- Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," *Atmosphere* 12, no. 2: 147, <https://doi.org/10.3390/atmos12020147>
- Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. *Nature* 627, 467. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>
- Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," *Journal of Space Weather and Space Climate* 11: 40, <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>.
- Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Solanki, S.K. et al. (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," *Nature* 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, <https://doi.org/10.1038/nature02995>.
- Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," *Climate* 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, <https://doi.org/10.3390/cli9110163>.
- Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447
- Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6227-6233 <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114>

- Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) “Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, <https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110>.
- Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) “Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints,” *Astronomy & Astrophysics* 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>.
- Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) “Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century,” *New Astronomy* 34 (January 2015): 221–233, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods *Climates of the Past* 8, 265–286 <https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf>
- World Weather Attribution (2021) “Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change.” July 7, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>.
- Yuan, et al. (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. *Communications Earth and Environment* 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3
- Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104090. <https://doi.org/10.1029/2023GL104090>

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

Fejezet-összefoglaló

A legutóbbi évtizedek során számos bizonyíték gyűlt össze arra vonatkozóan, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények (így a mezőgazdasági növények) számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdasága számára összességében előnyös. A légköri CO₂-szint emelkedése az összes főbb amerikai növényfaj termését növelte. Joggal feltételezhető, hogy az éghajlatváltozás összességében semleges vagy előnyös, és az amerikai mezőgazdaság legnagyobb része számára továbbra is az marad.

9.1 Ökonometriai elemzések

Az mezőgazdaságra gyakorolt klímaváltozási hatások ökonometriai elemzéseinek az a törekvése, hogy a hosszú távú terméshozam-változásokra adott információkat a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra adott válaszként, a gazdálkodók alkalmazkodási viselkedésére vonatkozó feltételezések alapján összegezze. Az egyik módszer a mezőgazdasági földterületek értékváltozásaira összpontosít. Az indoklás az, hogy ha az éghajlatváltozás hosszú távú nettó előny a mezőgazdaság számára, akkor azt a mezőgazdasági földterületek magasabb piaci értékének növelésére kell tőkésíteni, és fordítva. Míg az egyes növények profitálhatnak vagy károsodhatnak az éghajlatváltozásból, a gazdálkodók alkalmazkodási válaszait figyelembe véve a mezőgazdasági földterület értéke annak indexét képviseli, hogy a változások várhatóan előnyösek-e vagy sem. Mendelsohn et al. (1994) megvizsgálták a történelmi éghajlatváltozások és a mezőgazdasági földterületek értékének kapcsolatát, és arra a következtetésre jutottak, hogy a globális felmelegedés kismértékben előnyös lenne az amerikai mezőgazdaság számára.

Mendelsohn et al. módszere, amit David Ricardo, a földérték-tanulmányozásban úttörő 19. századi brit közgazdász után ricardói elemzésnek neveztek el, később kritika érte a szerzők részéről, akik azzal érveltek, hogy e módszer nem veszi figyelembe a földértékek közötti különbségeket, amelyek a fix helyhez kötött jellemzőknek tulajdoníthatók, így például a talajminőségnek, valamint a nem éghajlati változásoknak, beleértve a közeli urbanizációt is. Deschênes és Greenstone (2007) a mezőgazdasági profitot vizsgálták a földértékek helyett, és Mendelsohn et al. (1994) következtetéseire hasonló következtetésekre jutottak, nevezetesen arra, hogy a múltbeli éghajlatváltozások viszonylag csekély hatással voltak a gazdaságok jövedelmezőségére, és hogy a felmelegedés összességében valószínűleg csekély előnyökkel járna az amerikai mezőgazdasági ágazat számára. A kritikusokkal folytatott későbbi eszmecsere azonban arra készítette őket (Deschênes és Greenstone 2012), hogy felülvizsgálják következtetéseiket, és a klímafelmelegedés miatt az amerikai mezőgazdaságban potenciálisan nagy veszteségeket jósoljanak.

Burke és Emerick (2016) az 1980 és 2000 közötti hőmérséklet-ingadozásokat vizsgálták, és azzal érveltek, hogy a gazdák nem voltak képesek úgy alkalmazkodni a hőmérséklet-változásokhoz, mint ahogyan azt a ricardói módszer feltételezi, és hogy a klímaváltozás nagy negatív hatással lenne a kukorica- és szójahozamokra. Schlenker és Roberts (2009) hasonlóképpen érveltek amellelt, hogy a múltbeli felmelegedésből származó hozamnövekedés nem fog átragadni a jövőbe, és a kukorica- és szójahozamok meredeken csökkenni fognak ebben az évszázadban az éghajlatváltozás miatt.

Két újabb tanulmány azzal érvelt, hogy az ilyen pesszimista eredmények nem megbízhatóak. Ortiz-Bobea (2019) szerint a földértékek összesítik a mezőgazdasági és nem mezőgazdasági hatásokat, és az utóbbiakat ki kell szűrni. Létrehozott egy adathalmazt, amely a mezőgazdasági tevékenység készpénzes bérleti díjait használja a földérték mérésére, kifejezetten a mezőgazdasági tevékenység esetében. Míg a földérték-modell a klímafelmelegedés miatti jövőbeni veszteségeket vetített fel, ugyanez a modell, amelyet készpénzes bérleti díjakkal becsültek, nem ezt tette, ami arra a vezettet, hogy a szerző arra a következtetésre jutott, hogy a pesszimista eredmények a mezőgazdasági tevékenység hozamának pontatlan mérésének következményei. Bareille és Chakir (2023) egy nagy adatbázist állított össze a franciaországi mezőgazdasági eladási árakról olyan ingatlanok esetében,

amelyeket 1996 és 2019 között kétszer adtak el. Hagyományos ökonometria modellezéssel meg tudták ismételni a felmelegedés mezőgazdasági földértékekre gyakorolt negatív hatásait mutató pesszimista eredményeket. De kihasználva az ismételt értékesítési adatokat, amelyek információt nyújtanak a földárak helyspecifikus változásairól, úgy találták, hogy az eredmények fordítottak, és arra utalnak, hogy a klímaváltozás nagyon előnyös lesz a francia mezőgazdaság számára. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy az alkalmazkodást figyelembe véve a melegebb éghajlat a korábban becsültnél két-húszszor nagyobb pozitív előnyökkel járna a francia mezőgazdaság számára. Átlagosan, teljes alkalmazkodás esetén úgy találták, hogy a közepes RCP4.5 forgatókönyv szerinti klímaváltozás 2100-ra megduplázhathatja a francia termőföld értékét.

Mindezek a tanulmányok egyik fő hiányossága azonban, hogy kihagyják a CO₂-trágyázás szerepét. A klímaváltozást, ahogyan az jelen jelentéshez kapcsolódik, az üvegházgáz-kibocsátás, főként a CO₂ okozza. A fent említett ökonometria elemzések csak a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra összpontosítanak, és nem veszik figyelembe a további CO₂ jótékony növekedési hatását, amely ezeket hajtja. Amint a 2. fejezetben kifejtettük, a CO₂ a növények növekedésének egyik fő mozgatórugója, így ez a mulasztás az elemzést a klímaváltozás mezőgazdaságra gyakorolt előnyeinek alábecsülése felé torzítja.

9.2 A CO₂-dúsulás terepi és laboratóriumi vizsgálatai

A CO₂ növénynövekedésre gyakorolt hatását többek között a „szabad levegős dúsítási kísérletek” (FACE-parcellák) segítségével vizsgálták, amelyek során a növényeket körülvevő mezőkön kis CO₂-forrásokat helyeznek el, és rögzítik a növekedési reakciót a megnövekedett CO₂-szintre változó időjárási körülmények között. Ainsworth et al. (2020) körülbelül 250 ilyen vizsgálat eredményeit foglalja össze. Úgy találták, hogy a CO₂ 200 ppm-es emelése átlagosan a C3 növények terméshozamában 18 százalékos növekedést eredményezett. A C4 növények főként aszályos körülmények között mutattak előnyöket.

A FACE-parcella-kísérletek mellett több ezer laboratóriumi kísérletet végeztek a CO₂ hatásairól mindenféle növény növekedésére. Itt áttekintünk néhány eredményt a kulcsfontosságú amerikai mezőgazdasági növényekről.

Szója

A megnövekedett CO₂-koncentráció szójabab (*Glycine max* (L.) Merr.) növényekre gyakorolt hatásáról a kínai Huang-Huai-Hai síkság vízhiányos régiójában végzett tanulmányok kimutatták, hogy a megnövekedett CO₂-koncentráció javította a fotoszintézis sebességét, a vízfelhasználás hatékonyságát és a növekedést Li (2013) mind normál, mind aszályos körülmények között. A CO₂Science.org weboldal 108 publikált kísérletről számol be 1985 és 2019 között, amelyekben a szójababot dúsított CO₂-szintnek tették ki. Egy +300 ppm-es általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +50,9 százalék volt. Tíz tanulmány számolt be +600 ppm CO₂-dúsításról is, amely átlagosan 90,3%-kal növelte a fotoszintézist.

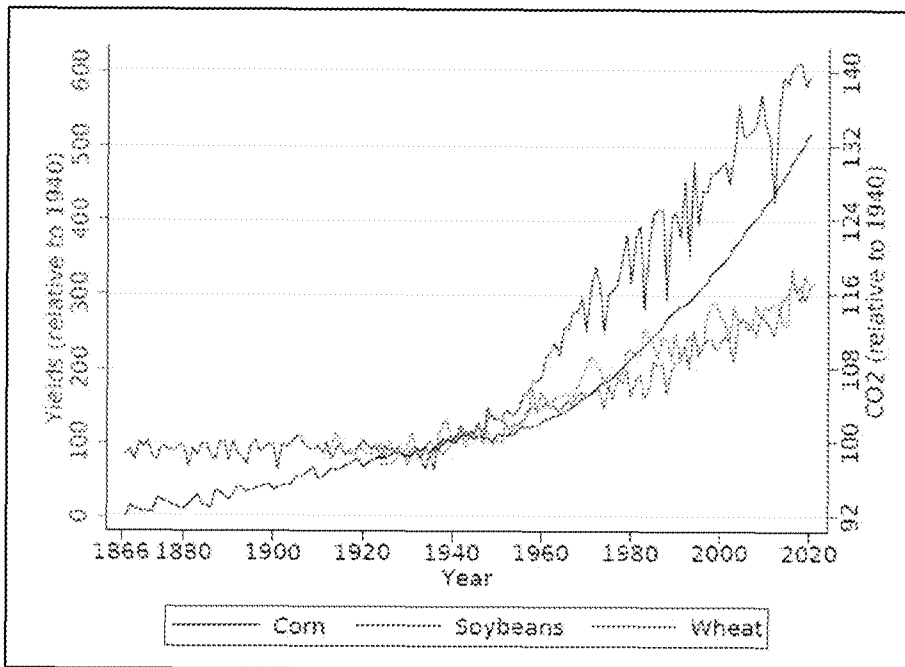
Kukorica

A CO₂Science.org weboldal 28 publikált kísérletről számol be 1983 és 2018 között, amelyekben kukoricát (*Zea mays* L.) tettek ki dúsított CO₂-szintnek. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +23,7 százalék volt. A kukorica a megnövekedett CO₂-szint mellett a szárazságtűrésből is profitál. Egy kísérleti tanulmány (Allen Jr., 2011) a növényeket napsütötte, szabályozott környezetű kamrákban 360 ppm (környezeti) és 720 ppm (emelt) CO₂-szint mellett vízstressznek tették ki. A szárazságstressz 41 százalékos növekedésvesztiséget okozott környezeti CO₂-szint mellett, de csak 13 százalékos veszteséget emelt CO₂-szint mellett.

Búza

A CO₂Science.org weboldal 92 publikált kísérletről számol be 1983 és 2020 között, amelyekben a közönséges búzát (*Triticum aestivum* L.) dúsított CO₂-szintnek tették ki. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +67,6 százalék volt. Blandino (2020) megmérte egy „javító”

hibrid búzafajta és szülőfajtáinak terméshozamát és tápértékét megemelt CO₂-szint (+166 ppm) mellett. A jelentések szerint a szemtermés +16 százalékkal nőtt, de a szemfehérje-szint 7 százalékkal csökkent. Azt is megállapították azonban, hogy a különböző búzafajták tápértéke eltérően reagált a megemelkedett CO₂-szintre, így megfelelő fajtaválasztással a termelők olyan búzafajtákat választhattak, amelyek a legjobban élnek a megemelkedett CO₂-szint által jelentett körülményekkel.



9.1. ábra: Az Egyesült Államok átlagos CO₂-szintje és a kukorica, a szója és a búza terméshozamai normalizálódtak, így 1940=100. Forrás: Taylor és Schlenker (2021)

További bizonyítékok

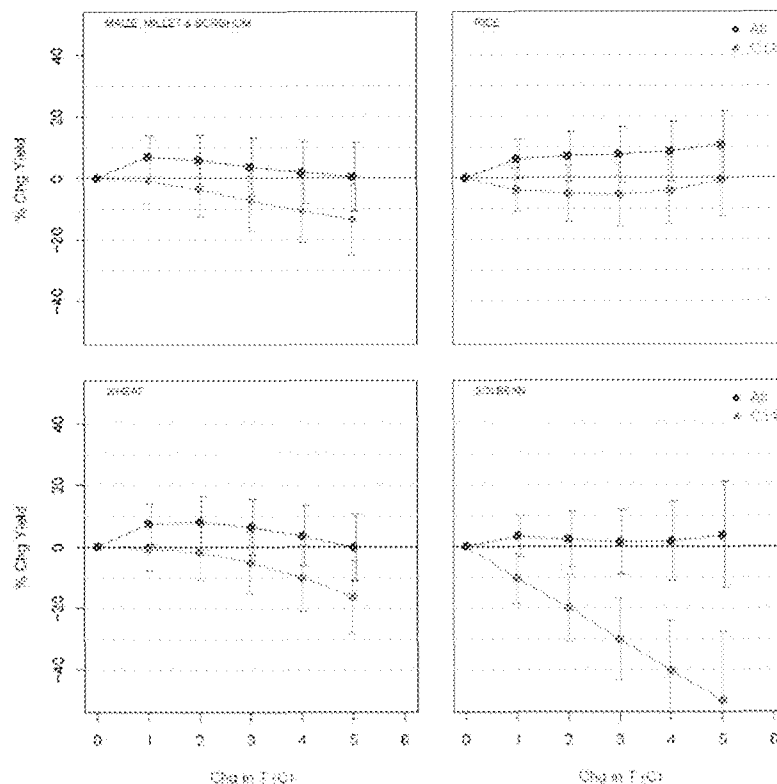
Az Egyesült Államok Nemzeti Gazdaságkutató Irodájának 2021-es jelentése (Taylor és Schlenker 2021) az Egyesült Államokban műholdas mérésekkel megfigyelt kültéri CO₂-szinteket használt fel, amelyekhez megyei szintű mezőgazdasági termelési adatokkal és más gazdasági változókkal illesztettek. Az időjárás, a szennyezés és a technológia hatásainak kiszűrése után a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a CO₂-kibocsátás 1940 óta 50-80 százalékkal növelte az amerikai növénytermesztést, ami sokkal nagyobb nyereséget eredményezett, mint amennyit korábban FACE-kísérletekkel becsültek. Úgy találták, hogy a CO₂-koncentráció minden ppm-es növekedése 0,5 százalékkal növeli a kukorica, 0,6 százalékkal a szójabab és 0,8 százalékkal a búza terméshozamát.

A növekedési előnyökön túl a többlet CO₂ fokozza a növények szárazsággal szembeni ellenálló képességét. Lásd a 2.1.3. szakaszban található diszkussziót.

9.3 Termésmodellezési metaelemzések

Annak ellenére, hogy bizonyítékok bősége áll rendelkezésre arra, hogy a CO₂ és a CO₂ által kiváltott felmelegedés növény-növekedésre közvetlenül előnyös, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA 2023) 2023-ban körülbelül ötszörösre növelte a szén-dioxid társadalmi költségének (SCC) becslését, nagyrészt a klímafelmelegedés okozta globális mezőgazdasági károk nagyon pesszimista 2017-es becslése alapján (Moore et al., 2017). Az EPA által használt két kármodell egyike a 2030-as szubszaharai szelek közel felét a Moore et al. (2017)

elemzése alapján előre jelzett globális mezőgazdasági károknak tulajdonította. Ez a tanulmány különféle éghajlati felmelegedési forgatókönyvek mellett végzett metaanalízist mezőgazdasági növények hozamváltozásait szimulálására. A Moore et al.-féle tanulmány a felmelegedés miatt minden növényfajra és minden régióra vonatkozóan a globális terméshozam csökkenését vetítette előre.



9.2. ábra: Terméshozamok CO₂-indukált éghajlati felmelegedés esetén. Kék: Moore et al. (2017) publikációja szerint. Zöld: a kihagyott adatok figyelembevétele után. Forrás: McKittrick (2025).

McKittrick (2025) újra megvizsgálta a Moore et al. adatbázisát, és megállapította, hogy bár az Moore-ék állítása szerint 1722 tanulmányt fed le, a ezeknek csak a fele (N=862) tartalmazott teljes megfigyelést, így a regresszioanalízishez rendelkezésre álló minta sokkal kisebb volt, mint amit a két tanulmány jelzett. McKittrick megjegyezte, hogy a leggyakrabban hiányzó megfigyelési tételek a környezeti CO₂-változás volt, és megállapította, hogy ezek sok esetben az alapul szolgáló tanulmányokból vagy az eredeti éghajlati forgatókönyv-táblázatokból visszanyerhetők voltak, ezáltal a felhasználható minta méretét 40 százalékkal megnövelte. Az újonnan rendelkezésre álló adatokat tartalmazó terméshozam-előrejelzések jelentősen megváltoztak. Amint a 9.2. ábra mutatja, míg a részleges adatkészlet a felmelegedés hozamcsökkenését sugallta (kék vonalak), a teljes adatkészlet állandó vagy növekvő globális hozamokat jelzett, még 5°C-os felmelegedés esetén is (zöld vonalak).

9.4 A CO₂-trágyázás és a tápanyagvesztés

A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂ által kiváltott biomassza-növekedést néha a fehérje és egyéb kulcsfontosságú tápanyagok, például a vas és a cink koncentrációjának csökkenése kíséri (Ebi et al. 2021). Néhány kísérlet kimutatta, hogy a magasabb CO₂-szinttel várhatóan együtt járó emelkedő hőmérséklet ellensúlyozza ezt a veszteséget (Köhler et al. 2019), bár az erre vonatkozó bizonyítékok vegyesek, akárcsak az a bizonyíték, hogy a mai napig megfigyelt tápanyag-hígulás teljes mértékben a magasabb CO₂-szintnek tulajdonítható (Ziska 2022). Ha tápanyag-hígulás következik be a növekvő CO₂-szint mellett, számos adaptív stratégia alkalmazható.

Először is, a mikrotápanyag-tartalom növelésére irányuló szelektív nemesítés (Saltzman et al. 2017) már bevált és költséghatékony agronómiai stratégiának bizonyult (Ebi et al. 2021). A stratégiák jelenthetnek mind hagyományos nemesítést, mind genetikailag módosított szervezeteket. Ez utóbbira példa az aranyrizs, amely megnövelt mennyiségű béta-karotint tartalmaz az A-vitamin az emberi szervezetben való bioszintézisének fokozása érdekében. Az optimális stratégiák helyspecifikusak, mivel növényenként, éghajlatonként és talajtípusonként változnak (Ebi et al. 2021). Másodszor, az élelmiszerek mikrotápanyagokkal való dúsítása már rutinszerű. A folsavat (egy B-vitamin) liszthez és sok más élelmiszerhez adják; jódot adnak az asztali sóhoz, a legtöbb kereskedelmi forgalomban kapható reggeli gabonapelyhet vassal és számos vitaminnal dúsítják stb. Harmadszor, a multivitamin tabletták formájában kapható étrend-kiegészítők olcsók, széles körben elérhetők és rutinszerűen fogyasztják őket.

Az adaptív stratégiákra való támaszkodással kapcsolatos egyik aggodalom az, hogy megvalósíthatók-e az alacsony jövedelmű országokban. A mikrotápanyag-hiány már most is problémát jelent a fejlődő világban, és az étrend-kiegészítők hatékony, alacsony költségű válasznak bizonyultak (Ebi et al. 2021). Azt is meg kell jegyezni, hogy az IPCC magas szintű felmelegedést generáló kibocsátási forgatókönyvei erős jövedelemnövekedést istartalmaznak. Az SSP forgatókönyvek³ azt feltételezik, hogy a 2005-ös szinthez képest a globális egy főre jutó jövedelem 2100-ra legalacsonyabb növekedési esetben (SSP3) megduplázódik, a legmagasabb kibocsátási esetben (SSP5) pedig közel 16-szorosára nő. Ebben a forgatókönyvben még a legszegényebb régiók (Afrika és a Közel-Kelet) egy főre jutó jövedelme is körülbelül 126 000 USD, ami 70 százalékkal magasabb, mint a jelenlegi amerikai egy főre jutó jövedelem (körülbelül 75 000 USD). Következésképpen ugyanazok a forgatókönyvek, amelyekben a CO₂-szint a legnagyobb mértékben növekszik, lényegében a globális szegénység is megszűnik, és ebben az esetben minden ország megengedhetné magának a szükséges étrend-kiegészítőket a mikrotápanyag-hiányok kezelésére, ha annak a szükségessége felmerülne, mert nem orvosolható a mezőgazdasági stratégiákkal.

Összefoglalva, évtizedekre visszamenően bőséges bizonyítékok vannak arra, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények, így a mezőgazdasági növények számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdaságának nettó előnyt jelent. Amennyiben a tápanyagok felhígulnak, rendelkezésre állnak enyhítő stratégiák, amelyeket meg kell vizsgálni és a helyi körülményekhez kell igazítani.

Hivatkozások

- Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant physiology*, 168(16), 1909-1918.
- Bareille, F. and R. Chakir (2023) The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 119
- Blandino, M. B. (2020). Elevated CO₂ impact on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(39), 10574-10585.
- Burke, Marshall and Kyle Emerick (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy* 8(3) August 2016 106—140 <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.20130025>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>

³ Lásd az összeállítást az Our World in Data oldalon.

- CO2Science.org (undated) Plant growth archive
http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject_b.php
- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO2 concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change* 6, 786–790 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Deschênes, Olivier and Michael Greenstone (2012) The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Reply to Comment *American Economic Review*. 102, no. 7: 3761-3773. <http://hdl.handle.net/1721.1/82641>
- Ebi, Kristie L, C Leigh Anderson, Jeremy J Hess, et al. (2021) Nutritional quality of crops in a high CO2 world: an agenda for research and technology development. *Environmental Research Letters* 16(6) 064045 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfcfa>
- Köhler, Iris H., Steven C. Huber, Carl J. Bernacchi, Ivan R. Baxter (2019) Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO2 concentrations. *The Plant Journal* 97(5) 872 – 886 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tpj.14166>
- Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112.
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *The American Economic Review*, Sept 1994 753-771.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Ortiz-Bobea, Ariel (2019) The role of nonfarm influences in ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*. 102 (3), 934–959.
- Saltzman, Amy, Ekin Birol, Adewale Oparinde et al. (2017) Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. *Annals of the New York Academy of Sciences* Volume 1390, Issue 1
<https://doi.org/10.1111/nyas.13314>
- Schlenker, Wolfram and Michael Roberts (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (37) 15594-15598 <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Taylor, Charles and Wolfram Schlenker (2023) Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO2 fertilization of US field crops. *National Bureau of Economic Research Working paper* 29320, <https://www.nber.org/papers/w29320>
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, Nov. 2023,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
- Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment* 5 June 2024
<https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>

Ziska, Lewis H (2022) Rising Carbon Dioxide and Global Nutrition: Evidence and Action Needed.
Plants 1(7), 1000; <https://doi.org/10.3390/plants11071000>

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

Fejet-összefoglaló

A szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit mindenekelőtt a népességnövekedés és a gazdasági növekedés határozza meg. A technológiai fejlődés, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési előírások, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Az Egyesült Államok gazdaságának bővülése enyhítette a katasztrófa költségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja. A hőséggel kapcsolatos elhalálozási kockázat az alkalmazkodási (adaptációs) intézkedéseknek (így a légkondicionálás bevezetésének) a következményeként jelentősen csökkent. Mindezek a megfizethető energia elérhetőségétől függenek. Az Egyesült Államokban az elhalálozási kockázat várhatóan még szélsőséges felmelegedési forgatókönyvek esetén sem emelkedik, amennyiben az emberek képesek a változásokhoz alkalmazkodni.

10.1 A társadalmi-gazdasági háttér

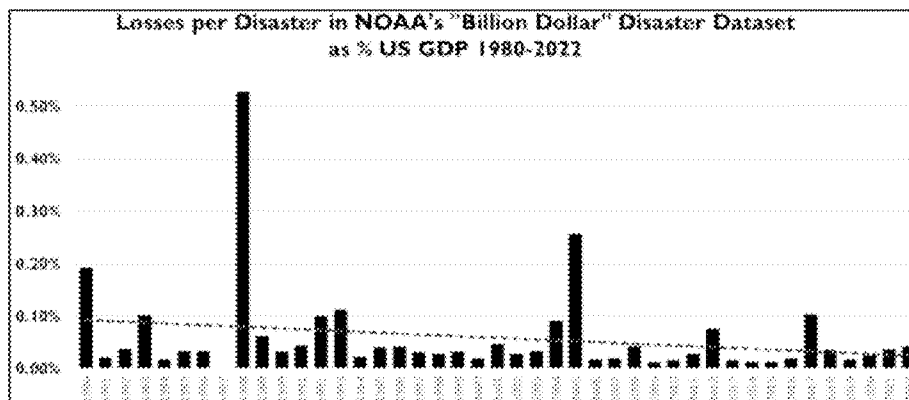
Az ember okozta éghajlatváltozás kockázatbefolyásoló tényezője a természetes időjárás és az éghajlat változékonysága. E tényezőt a part menti és az egyéb katasztrófáknak kiszolgáltatott régiók gazdagságának kitettsége, valamint a szegényebb lakosság sebezhetősége határozza meg. Az Egyesült Államokban az éghajlati kockázat alakulását társadalmi tényezők, nem pedig a tényleges időjárási és éghajlati veszélyek változásai határozták meg. Az időjárási katasztrófák okozta halálesetek száma 1900 óta jelentősen csökkent, annak ellenére, hogy az Egyesült Államok lakossága 1900-ban 76 millióról 2020-ra több mint 331 millióra nőtt (Goklany 2011). Például a galvestoni hurrikán 1900-ban több mint 8000 ember halálát okozta (az Egyesült Államok lakosságának 0,01 százaléka), míg a legsúlyosabb közelmúltbeli katasztrófa, a 2005-ös Katrina hurrikán csak 1800 ember halálát (vagyis az Egyesült Államok lakosságának 0,0006 százaléka) (NOAA Nemzeti Hurrikánközpont 2025; Egyesült Államok Népszámlálási Hivatala 2025).

A technológiai fejlődés jelentősen csökkentette a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A korai figyelmeztető rendszerek, a műholdas megfigyelés és a jobb időjárás-előrejelzés csökkentette a halálesetek számát, bár a pontos számokat nehéz számszerűsíteni (Deryugina és Hsiang 2023). Az amerikai időjárás-előrejelzési becslések szerint éves szinten 31,5 milliárd dolláros haszonnal csökkentik az időjárási események okozta veszteségeket, védve emberéleteket, vagyontárgyakat, valamint támogatva a mezőgazdaságot és a közlekedést (NRC 2010). A jobb hurrikán-előrejelzés csökkentette a partraszállás előtti és utáni kiadásokat, a hurrikánonkénti éves költségcsökkenés becslések szerint 5 milliárd dollár (Molina és Rudik 2024).

Az infrastrukturális fejlesztés jelentősen hozzájárult a szélsőséges időjárási események okozta veszteségek csökkentéséhez. Az építési szabályzatok, mint például a Floridában az Andrew hurrikán (1992) után bevezetett előírás, azáltal csökkentették a veszteségeket, hogy biztosították, hogy az épületek ellenálljanak a nagy szélnek és az áradásoknak. A 2002 után épült házak a Michael hurrikán (2018) alatt minimális károkat szenvedtek, ellentétben a régebbi házakkal (FEMA 2020). A tengerparti falak, mint például a Galveston tengerparti fala, védelmet nyújtanak a hullámverés és a viharhullámok ellen. A New Orleans-i hurrikán- és viharkár-kockázatsökkentő rendszer sikeresen mérsékelte a viharhullámot az Isaac hurrikán (2012) alatt (Battelle Memorial Institute 2013). Az Egyesült Államok szárazföldi gátai azáltal segítenek az áradások szabályozásában, hogy tárolják a heves esőzések során felgyülemlett felesleges vizet. A becslések szerint a Tennessee Valley Authority (TVA) gátjai a TVA régióban, valamint az Ohio és Mississippi folyók mentén körülbelül 309 millió dollár éves árvíz kárt akadályoznak meg (TVA, 2025). A Helene hurrikán (2024) során a TVA stratégiai körülbelül 406 millió dollárnyi potenciális kárt akadályoztak meg (APPA 2024).

10.2 Az adatok által jelentett kihívások

A NOAA 1980 óta közöl adatokat az Egyesült Államokban évente előforduló időjárással kapcsolatos katasztrófákról. A becslések szerint a kár meghaladta az 1 milliárd dollárt (inflációval korrigálva), és 2008-tól kezdődően jelentős növekedést mutat. A NOAA és más kormányzati tisztviselők a milliárd dollárnyi katasztrófa-sorozat (Billion Dollar Disaster) emelkedő tendenciáját említették bizonyítékként arra, hogy az éghajlatváltozás súlyosbítja a szélsőséges időjárást (Pielke Jr., 2024). Az idő múlásával azonban az Egyesült Államok népessége és vagyona drámaian megnőtt, így amikor szélsőséges időjárási vagy éghajlati esemény következik be, még akkor is nagyobb a kár, ha nincs mögöttes trend a szélsőséges időjárás gyakoriságában vagy intenzitásában. Pielke Jr. (2024) kimutatja, hogy az időjárási katasztrófákra jutó veszteségek GDP-arányosan körülbelül 80 százalékkal csökkentek 1980 óta, amint azt a 10.1. ábra is mutatja. Pielke Jr. (2024) azt is állította, hogy NOAA nem csupán áttekinthetetlen adatforrásokra és a nem bejelentett kiigazításokra támaszkodott, hanem a NOAA a milliárd dolláros katasztrófákra vonatkozó adatait sem normalizálta a lakosság kitettségének és vagyonváltozásainak megfelelően. 2025 májusában a NOAA bejelentette, hogy visszavonta a Billion Dollar Disaster („milliárd dolláros katasztrófa”) telnevezésű publikációs termékét (Pielke Jr., 2025).



10.1. ábra: Katasztrófák okozta veszteségek a bruttó hazai termék százalékában a NOAA ún. Billion Dollar Disaster (milliárd dolláros katasztrófa)-adatbázisában (2023 júliusában letöltött verzió), 1980–2022. Forrás: (Pielke, Jr. 2024)

Összefoglalva, a szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit a népességnövekedés és a gazdasági növekedés uralja. A technológiai fejlesztések, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek, jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési szabályzatok, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Végül az Egyesült Államok gazdaságának bővülése felhívította a katasztrófaköltségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja.

10.3 Halálozás a hőmérsékleti szélsőségek miatt

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

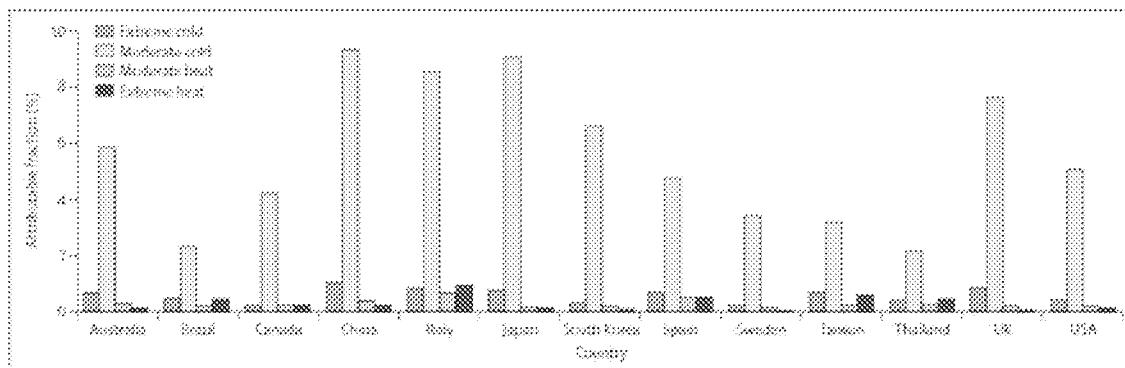
A hőmérsékleti szélsőségek változásai a legbiztosabb hatások közé tartoznak, amelyek várhatóan egy felmelegedő világban várhatóak. Logikus, hogy a szélsőséges hőség eseményei valószínűleg gyakoribbá válnak, míg a szélsőséges hideg események ritkábbá. Ez a mintázat a

történelmi időszakban nyilvánvaló, és a további felmelegedéssel várhatóan folytatódni fog, bár nem az Egyesült Államok kontinentális részén (6. fejezet),

Hőségek idején a halálozást jellemzően hőguta és hőkimerültség okozza, míg hideg szélsőségek idején a halálozás jellemzően a hipotermiából és a szív megterheléséből fakad. A globális halálozási arány hideg körülmények között lényegesen magasabb, mint melegben (Zhao et al. 2021, Ritchie 2024). A hőséggel összefüggő halálozással ellentétben a hideg időjárás kockázatai már mérsékelt hideg körülmények között is fennállnak (Gasparini et al. 2015, Lee és Dessler 2023). Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) (a Betegségellenőrzési és Megelőzési Központok adataira hivatkozva) arról számol be, hogy 1999 és 2015 között átlagosan 2,2 haláleset történt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hideg volt a fő kiváltó ok, és további 2,4 haláleset egymillió amerikaira vetítve, amelyeknél a hideg közrejátszott (EPA 2025). Ezzel szemben 1,3 haláleset volt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hőség volt a fő ok, és további 0,8 haláleset egymillió emberre vetítve, amelyeknél a hőség közrejátszott. Ezzel a mutatóval mérve a hideg körülbelül kétszer annyi időjárással összefüggő halálesetért felelős, mint a hőség.

Azok az epidemiológiai módszerek, amelyek a korrelációs bizonyítékokat – nem csak a halotti anyakönyvi kivonatokat – veszik figyelembe, azt mutatják, hogy a hideg/meleg arány sokkal magasabb lehet. Egy 13 országban végzett, 1985 és 2012 között 74 millió halálesetet felölelő tanulmány becslése szerint a halálesetek átlagosan 7,7 százaléka az optimális tartományon kívüli hőmérsékletnek volt tulajdonítható, ebből 7,4 százalék a hidegnek, és csak 0,4 százalék a melegnek (Gasparini et al. 2015). Más szóval, a hideg időjárás 18,5-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.

A 10.2. ábra Gasparini et al. (2015) eredményeinek országokénti eloszlását mutatja. Az Egyesült Államokban a hőmérsékletnek tulajdonítható halálesetek aránya 5,9 százalék, ebből 5,5 százalék a hidegre vezethető vissza, így a hideg időjárás 14-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.



10.2. ábra: A szélsőséges és mérsékelt hidegnek és melegnek tulajdonítható halálozások országoként. Forrás: Gasparini et al. (2015) alapján reprodukálva.

Erős bizonyítékok léteznek arra, hogy az emberek alkalmazkodnak az időjárási kockázatokhoz. Lee és Dessler (2023) arról számoltak be, hogy az Egyesült Államok 40 városában a hőmérséklettel összefüggő halálesetek 86 százaléka a hideggel összefüggő halálozásnak volt köszönhető, és hogy az évszakos hőmérséklet emelkedésével az alkalmazkodás miatt a halálozás relatív kockázata mind a meleg, mind a hideg városokban csökkent. Allen és Sheridan (2018) megállapították, hogy a rövid, éveleji hideg események 2-5-ször halálosabbak, mint a meleg események, de mind a hideg, mind a meleg szélsőségek halálozási kockázata közel nullára csökken, ha az események a hideg évszak végén következnek be.

Davis et al. (2003) 28 amerikai városban vizsgálta a hőséggel összefüggő halálozást az 1960-as évektől az 1990-es évek végéig, és azt találták, hogy a mintavételi időszakban a hővel összefüggő elhalálozás háromnegyedével csökkent. Bobb et al. (2014) több mint 100 amerikai város 106 millió lakosának elhalálozási adatait vizsgálta, és azt találta, hogy az 1987 és 2005 közötti időszakban az

átlagos hőség okozta halálozás 60 százalékkal csökkent, 51 ezrelékes halálesetről 19-re. Azt is kimutatták, hogy a legnagyobb csökkenés a 75 év feletti idősök körében következett be. Egy 211 amerikai városban 1962 és 2006 között bekövetkezett 42 millió halálesetet vizsgáló tanulmányban Nordio et al. (2015) a túlzott hőség okozta halálozás kockázatában több mint 90 százalékos csökkenést találtak.

A hőség okozta halálozás jelentős csökkenésével összefüggésben a hőmérséklet emelkedése nettó életmentést jelent, mivel csökkenti a hideg események által okozott halálesetek számát. Az AR6 Munkacsoport 2. fejezetének 16.2.3.5. fejezete (O'Neill et al. 2022) elismeri, hogy a hőség okozta halálozási kockázat idővel csökken:

A hőségnek tulajdonítható elhalálozási arányok a legtöbb országban az idők során csökkentek az egészségügyi rendszerek általános javulása, a lakossági légkondicionálás növekvő elterjedtsége és a viselkedésbeli változások miatt. E tényezők határozzák meg a lakosság hőérzékenységet, túlsúlyba kerülve a hőmérsékletváltozás hatásával szemben.

Az IPCC az AR6 Összefoglaló jelentésében mégis félreértelmezi az általános helyzetet. A dokumentum A.2.5. szakasza kimondja: „A szélsőséges hőség eseményeinek növekedése minden régióban emberi halálozáshoz és megbetegedéshez vezetett (*nagyon magas megbízhatóság*).” De hallgat arról, hogy a szélsőséges hideg események során a halálesetek száma nagyobb mértékben csökkent.

Az Egyesült Államokban megfigyelt hőséggel összefüggő elhalálozási arány-csökkenést kifejezetten az alkalmazkodásnak tulajdonították. Wang et al. (2018) 209 amerikai városban vizsgálta meg a hőhullámokkal összefüggő elhalálozási arány térbeli változékonyságát 1962 és 2006 között. Míg az egyszerű korreláció a hőhullámok alatti halálozási kockázat növekedését sugallta, a hőhullám intenzitásához való alkalmazkodás figyelembevétele azt eredményezte, hogy a hatás közel nullára esett, és statisztikailag jelentéktelenné vált. Epidemiológiai modelljük eredményeit felhasználva a hőséggel összefüggő halálozási arányt négy RCP felmelegedési forgatókönyv (köztük az RCP8.5) szerint (adaptív viselkedéssel és anélkül) 2050-ig kivetítették. Feltételezték, hogy az emberek továbbra is alkalmazkodnak a hőhullám-kockázathoz azokban a régiókban, ahol élnek. Wang et al. (2018) az Egyesült Államokban nemcsak a hőséggel összefüggő halálozások növekedését vetíti előre, hanem az általános halálozási arány csökkenését is. Arra a következtetésre jutottak, hogy

„Az alkalmazkodás figyelmen kívül hagyása a hőhullámokkal kapcsolatos jövőbeli elhalálozási arány jelentős túlbecsléséhez vezetne... Az alkalmazkodást figyelembe véve a hőséggel összefüggő teljes elhalálozási arány 2050-re idővel nem változna jelentősen a 2006-os szinthez képest.”

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

Egy 2016-os, az Egyesült Államokban a hőmérséklet-ingadozásokkal összefüggő hosszú távú elhalálozási kockázatokról szóló tanulmány (Barreca et al. 2016) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban az elhalálozási arány növekedése összefügg mind a hideg, mind a meleg időjárással. Idővel azonban az áram bevezetése, valamint a központi fűtés és a légkondicionálás (AC) elterjedése drámaian csökkentette mindkét kockázatot, különösen a meleg időjárással összefüggő kockázatokat. 1960 előtt egy 32°C feletti nap 2,2 százalékkal növelte az átlagos elhalálozási kockázati arányt, de 1960 után ugyanez az időjárás csak 0,3 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, ami 85 százalékos csökkenést jelent. 1960 előtt a 4°C (39°F) alatti hőmérséklet körülbelül 1 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, de 1960 után ugyanez az időjárás e számnak csak körülbelül a felét tette ki. A hagyományos háztartási fejlesztéseken keresztüli alkalmazkodás drámaian csökkentette a lakosság kiszolgáltatottságát az időjárási szélsőségekkel szemben. A meleg időjárás miatti elhalálozás

teljes csökkenése a beltéri légkondicionálók széles körű elterjedésének volt betudható, ami a megbízható és megfizethető áram elérhetőségétől függ.

Ennek a megállapításnak a következménye, hogy a fűtési és a hűtési rendszerek használata az energia megfizethetőségétől függ. Doremus et al. (2022) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban a gazdag és a szegény háztartások hasonló ütemben igazítják energiakiadásait a mérsékelt hőmérséklet-ingadozásokra, de nem a szélsőséges hőmérséklet-ingadozásokra. Amikor a hőmérséklet nagyon hideg szintre ($< 5^{\circ}\text{C}$) ingadozik, a magas jövedelmű háztartások energiakiadásai 1,2 százalékkal, az alacsony jövedelmű háztartásokéi pedig csak 0,5 százalékkal nőnek. Nagyon forró napokon ($>30^{\circ}\text{C}$) a magas jövedelmű háztartások áramkiadásai 0,5 százalékkal nőnek, míg az alacsony jövedelmű háztartásokéiban egyáltalán nem változnak. Ez utóbbi eredmény még azokban az almintákban is megfigyelhető, ahol minden háztartásban van légkondicionáló. Cong et al. (2022) hasonló eredményekről számoltak be egy arizonai háztartásokból álló mintán. Mindez azt mutatja, hogy a fűtési és hűtési rendszerek széles körű elterjedése ellenére az energia megfizethetlensége következtében az alacsony jövedelmű háztartások ki vannak téve az időjárási szélsőségeknek.

Hivatkozások

- Allen, M.J. and S.C. Sheridan (2018) Mortality risks during extreme temperature events (ETEs) using a distributed lag non-linear model. (2018) *International Journal of Biometeorology* 62, 57–67 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1117-4>
- American Public Power Association. (APPA, 2024, March 7). TVA flood mitigation strategies prevented approximately \$406 million in potential damages. Public Power Current. <https://www.publicpower.org/periodical/article/tva-flood-mitigation-strategies-prevented-approximately-406-million-potential-damages>
- Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro (2016), Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century, *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 105–159.
- Battelle Memorial Institute. (2013, December). Final independent external peer review report: Hurricane Isaac (2012) assessment (Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans District). <https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/PeerReview/TCN13-003HurrIsaacAssessIEPRFinal.pdf>
- Bobb JF, RD Peng, ML Bell and F Dominici (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* 122:811–816; <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392>
- Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications* 13, 2456 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
- Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” *Environmental Health Perspectives* 111(14) November 2003 pp. 1712—1718 <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.6336>
- Deryugina, T., & Hsiang, S. M. (2023). Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States (NBER Working Paper No. 31361). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w31361>
- Doremus, JM, I. Jacqz and S. Johnston (2022), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” *Journal of Environmental Economics and Management*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2022.102609> .
- Environmental Protection Agency (2025) Climate Change Indicators. <https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators>

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020, February 13). The role of Florida's building codes in Hurricane Michael recovery. <https://www.fema.gov/case-study/role-floridas-building-codes-2018-hurricane-michael>
- Gasparini, A., Y. Guo, M. Hashizume et al. (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet* 386: 369-385 July 25, 2015 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Goklany, I. M. (2011). Deaths from extreme weather events, 1900–2010. Reason Foundation. https://a8d50b36.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2011/09/deaths_from_extreme_weather_1900_2010.pdf
- Lee, Jangho and Andrew Dessler (2023) Future Temperature-Related Deaths in the U.S.: The Impact of Climate Change, Demographics, and Adaptation. *GeoHealth* 7(8) August 2023 <https://doi.org/10.1029/2023GH000799>
- Molina, R and I Rudik (2024) The value of improving hurricane forecasts. National Bureau of Economic Research Working Paper 32548 June 2024. <https://www.nber.org/digest/202409/value-improving-hurricane-forecasts>
- National Hurricane Center. (n.d.). Costliest U.S. tropical cyclones tables updated. NOAA National Hurricane Center. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/>
- National Research Council. (2010). Adapting to the impacts of climate change. The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/12888/chapter/2>
- Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). “Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change” *Environment International* Volume 81, pp 80-86 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009>.
- O'Neill, B., et al. (2022). Key risks across sectors and regions. In AR6 Working Group II Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2411–2538). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch
- Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. *npj Natural Hazards*, 1, Article 12. <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0>
- Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. The Honest Broker [Substack]. <https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters>
- Ritchie, H. (2024). How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>
- Tennessee Valley Authority (TVA). (n.d.). Flood management. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.tva.com/environment/managing-the-river/flood-management>
- U.S. Census Bureau. (n.d.). Decennial census by decade. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census/decade.html>
- Wang, Yan, Francesco Nordio, John Nairn, Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) “Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality” *Environmental Research* 161 pp. 464—471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049>
- Zhao, Q., et al. (2021). Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(7). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4)

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

Fejezet-összefoglaló

A közgazdászok a gazdasági növekedés szempontjából az éghajlatot már régóta viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják, e nézetet maga az IPCC is megerősíti az AR5-ben. A újfősdratú klímagazdaságtan felismerte, hogy a CO₂ miatti felmelegedésnek ugyan lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik az agresszív csökkentési szakpolitika indoklásához, és hogy a globális felmelegedés „megállítása” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szint esetén is nagyobb kárt okozna, mintha nem tennénk semmit sem. Egy 2012-es nagy visszhangot kiváltó tanulmány megállapítása szerint a globális felmelegedés káros hatással lenne a szegény országok növekedésére, de e megállapítás később nem bizonyult megalapozottnak. A modellezési bizonytalanságokat teljes mértékben figyelembe vevő tanulmányok vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására vonatkozólag, vagy arra a következtetésre jutnak, hogy a szegény országokra ugyanúgy a javukra szolgál, mint a gazdagoknak.

A szén-dioxid (a „karbon”) társadalmi költségére (SCC) vonatkozó becslés a jövőbeli gazdasági növekedés, a társadalmi-gazdasági folyamatok, a kamatlábak, az éghajlati károk és a rendszerreakciók ismeretlen tényezői miatt rendkívül bizonytalan. Az SCC nem mond semmiféle érdemi információt a klímaváltozás gazdasági vagy társadalmi hatásairól. Egy olyan indexet szolgáltat, amely az éghajlattal és a gazdasággal kapcsolatos feltételezések nagy hálózatait dollárértékekkel köti össze. Egyes feltételezésekből magas SCC-re következtetnek, míg másokból alacsony vagy negatív SCC adódik (azaz a kibocsátás társadalmilag hasznos). A kiindulási feltételezések melletti vagy elleni bizonyítékokat függetlenül kell megállapítani; az így kapott SCC semmiféle további információt nem ad e feltételezések érvényességéről. Billenőpontok lehetőségének figyelembevétele nem indokolja az SCC-becslések jelentős módosítását.

11.1 Klímaváltozás és gazdasági növekedés

11.1.1 Áttekintés

Régi megfigyelés, hogy a gazdaságok általában rosszul teljesítenek a nagyon hideg és a nagyon meleg régiókban, az optimum valahol a kettő között van (Nordhaus, 2006). Ez azt jelenti, hogy a felmelegedés káros lesz a forró régiókban, de előnyös a hidegekben. A hőmérséklet-érzékeny gazdasági tevékenység, amikor csak lehetséges, a legmegfelelőbb helyre vándorol, ahol a társadalom alkalmazkodik a helyi éghajlathoz. Részben ezekre a megfigyelésekre alapozva, 1992-ben Thomas Schelling, az Amerikai Gazdasági Társaság akkori elnöke azzal érvelt, hogy az éghajlatváltozásnak az Egyesült Államok gazdasági tevékenységére gyakorolt hatásai csekélyek lennének a sok más változáshoz képest, amelyek bekövetkeznének (Schelling 1992).

... A gyártás ritkán függ az éghajlattól, és ahol korábban a hőmérséklet és a páratartalom befolyásolta a helyzetet, a légkondicionálás közbelépett. Amikor a Toyota Ohio, Alabama és Dél-Kalifornia közül választja ki egy autószerelő üzem helyszínét, a földrajzi szempontok fontosak, de nem az éghajlat miatt... A pénzügyeket kevésbé befolyásolja az éghajlat; hasonlóan az egészségügyhöz, az oktatáshoz vagy a műsorszóráshoz. A közlekedést befolyásolhatja, de az elmúlt 30 évben a minden időjárási körülmény között elérhető leszállás és felszállás terén elért fejlesztések nagyobbak, mint az éghajlat által okozott bármilyen különbség. Ha az átlagos hatás felmelegedés, a jeges vízi utak és a hőeltakarítás jelentősége csökkenhet.

Az építőiparra hatással van, főként a hideg, és ha az átlagos hatás a felmelegedés irányába mutat, abból az építőipar kismértékben profitálhat.

A változás valójában a mezőgazdaságot érinti. De még ha a mezőgazdasági termelékenység a következő fél évszázadban egyharmaddal is csökkenne, az egy főre jutó GNP-t, amelyet 2050-re elérhettünk volna, csak 2051-ben érnénk el. ...

Arra a következtetésre jutottam, hogy az Egyesült Államokban, és valószínűleg Japánban, Nyugat-Európában és más fejlett országokban a gazdasági teljesítményre gyakorolt hatás elhanyagolható lesz, és valószínűleg észre sem fogjuk venni.

Harminc évvel később maga az IPCC is gyakorlatilag ugyanezt a megállapítást tette az ötödik értékelő jelentésében (Arent et al. 2014, kiemelés tőlem).

A legtöbb gazdasági ágazatban az éghajlatváltozás hatása csekély lesz más tényezők hatásaihoz képest. A népesség, az életkor, a jövedelem, a technológia, a relatív árak, az életmód, a szabályozás, a kormányzás és a társadalmi-gazdasági fejlődés számos egyéb oldalának változása a gazdasági áruk és szolgáltatások kínálatára és keresletére olyan mértékben fog hatással lenni, amely nagyban meghaladja az éghajlatváltozás hatását.

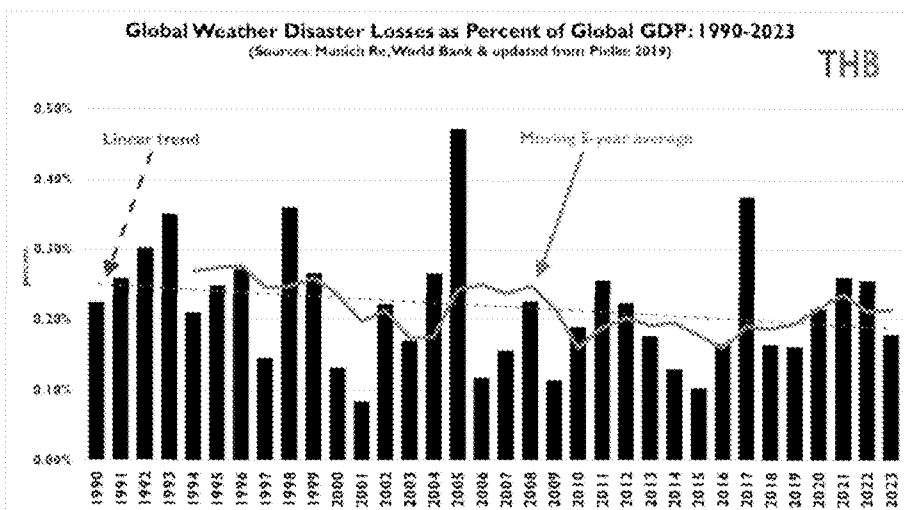
Az AR5 óta felhalmozott bizonyítékok nem változtatnak ezen az értékelésen. Mohaddes et al. (2023) megállapították, hogy a meleg időjárási sokkok kismértékben negatív hatással vannak az Egyesült Államok államszintű termelésére, de nem a jövedelemre, míg a hideg időjárási sokkok mindkettőre negatív hatással vannak, és a hatások körülbelül négyszer nagyobbak, ami azt jelenti, hogy a melegebb körülményekre való áttérés összességében nettó gazdasági hasznot hozna az Egyesült Államok számára.

Ezeket az állításokat a tapasztalatok is alátámasztják. 1900 óta az átlagos globális felszíni hőmérsékleti anomália 1,3°C-kal emelkedett, ami körülbelül annyi, amennyit az IPCC a következő évszázadban mérsékelt kibocsátási forgatókönyv szerint előre jelez. De ugyanakkor, amikor a Föld melegeedett, és a népesség ötszörösére nőtt, az emberiség soha nem látott mértékben kezdett virágozni. Például a globális átlagos élettartam harminckét évről hetvenkét évre nőtt, az egy főre jutó gazdasági aktivitás hétszeresére nőtt, a szélsőséges időjárási események által okozott elhalálozási arány pedig ötvenszeresére zuhant. Az éghajlatváltozás miatti kárelőrejelzések jellemzően arról szólnak, hogy az emberiség életkörülményei mennyivel javulnak, és nem állítják azt, hogy abszolút értelemben rosszabb lesz (O'Neill 2023).

Bár a szélsőséges időjárási események költségesek, minden modern gazdaságban egyre kevésbé fontosak (Formetta és Feyen, 2019). 1990 óta az időjárással kapcsolatos katasztrófaveszteségek a globális GDP-hez viszonyítva csökkentek (Pielke Jr, 2018, 2020), akárcsak az elhalálozási kockázatok (Formetta és Feyen, 2019). A gazdasági időjárással kapcsolatos biztosítási kifizetések ugyan emelkednek, de ezt teljes mértékben magyarázza a gazdaság méretének és a biztosított eszközállomány értékének növekedése. A szélsőséges időjárási események számának korábbi növekedése nem gyakorolt jelentős (pozitív vagy negatív) hatást a biztosítótársaságok piaci értékére (Hu és McKittrick, 2015). A múltbeli szélsőséges időjárási eseményeknek sem volt jelentős hatásuk az amerikai bankok teljesítményére (Blickle et al., 2021); sőt, a felmelegedésről kimutatták, hogy a pénzügyi és biztosítási szektor számára előnyös (Mohaddes et al., 2023). Az alábbi 11.1. ábra szemléltető jellegű. Ezen okok miatt a közgazdászok régóta vonakodnak támogatni az éghajlatváltozás „megállítására” vagy akár az üvegházgáz-kibocsátás agresszív csökkentésére irányuló kísérleteket, mert a költségek nem érnék meg. Ahogy a klímapolitika közgazdaságtanának egyik kritikus fogalmazott (Storm 2017):

A mainstream klímagazdaságtan komolyan veszi a globális felmelegedést, de zavarba ejtő módon arra a következtetésre jut, hogy az optimális gazdaságpolitika az, ha szinte semmit

sem teszünk ellene... A kontraszt feltűnő. Míg a klímatudomány hangos és világos üzeneteket küld arról, hogy a fosszilis tüzelőanyagok kivonását most kell elkezdni, le kell mondani a szénről és az olajról, és az erőforrásokat megújuló energiaforrásokból működő technológiai rendszerek felé kell irányítani, hogy a felmelegedést a 2°C-os határérték alatt tartsuk (IPCC 2014), a mainstream klímagazdaságtan azt állítja, hogy a túlságosan ambiciózus klímacélok szükségtelenül károsítják a gazdaságot, és az azonnali dekarbonizáció túl drága. A legtöbb klímagazdaságtan-szakértő ezért azt javasolja az emberiségnek, hogy csak várjon és figyeljen.



11.1. ábra: A globális időjárási veszteségek a GDP arányában. Forrás: Pielke Jr. (2023)

A mainstream közgazdaságtan álláspontját a klímapolitikai kérdésben legjobban az elmúlt három évtized integrált értékelési modelljeinek (IAM) az éghajlatváltozási politikával kapcsolatos eredményei képviselik, amelyekért William Nordhaus, a Yale Egyetem közgazdásza 2018-ban közgazdasági Nobel-emlékdíjat kapott. Az IAM-ek (invazív integrált klímamodellek) az éghajlati károk szimulálásának és az optimális politikai válasz értékelésének céljából gazdasági, éghajlati és társadalmi adatokat egyesít egységes keretrendszerbe (Resources for the Future, 2025). Nordhaus munkája általánosságban a mérsékelt globális klímapolitikát támogatta, az agresszív intézkedéseket nagyrészt a század végére halasztották. Nordhaus az 1990-es évek elején fejlesztette ki az úgynevezett Dinamikus Integrált Klíma- és Gazdaságmodellt (DICE) (Nordhaus, 1993), annak érdekében, hogy hosszú távon tanulmányozhassa a klímaváltozás, a klímapolitika és a globális gazdasági növekedés közötti kölcsönhatást. A DICE feltételezi, hogy a globális kibocsátás-szabályozás költségmentesen koordinálható, és azt a kérdést teszi fel, hogy mi legyen az optimális politikai cél. A DICE modell éghajlati komponense egyszerűsített klimatológiai modellezésen alapul. A DICE modell Nordhaus Nobel-díjjal való elismerése idején érvényes verzióját Nordhaus (2018) írta le; a CO₂-megduplázódás éghajlati érzékenységi paramétere 3,1°C volt, ami összhangban van az IPCC-jelentésekben szereplő legjobb becsléssel (3,0°C).

Az alap (klímapolitika nélküli) forgatókönyv mindössze 0,4 billió (T, trillion) dolláros globális kibocsátáscsökkentési költséggel jár, és 134,2 billió (trillion) dolláros globális klímakárt okoz, ami összesen 134,6 billió dolláros költséget jelent. A DICE klímamodel-komponense 2100-ra 4,1°C-os felmelegedést vetít előre az iparosodás előtti hőmérsékletekhez képest. Megjegyzendő, hogy ez becsült felmelegedés magasabb, mint számos IPCC klímamodelle.

Az optimális szakpolitikai forgatókönyv alig tér el a szokásos üzletmenet útjától. +3,5°C-os felmelegedést céloz meg, más szóval a fosszilis tüzelőanyagok használatát mérsékeltten csökkentjük, és egyébként csupán együtt élünk szinte a teljes felmelegedéssel. Ez arra utal, hogy a CO₂-kibocsátás

nagy része kevésbé káros, mint azok a politikák, amelyek a mérsékléséhez szükségesek lennének. A felmelegedés megakadályozására tett kísérletek költségei hamar meghaladják az előnyöket. A felmelegedés 2,5°C-ra korlátozásának célkitűzése 177,8 billió dolláros összköltséget ad ki, ami 43,2 billió dollárral rosszabb, mintha semmit sem tennénk. Nordhaus nem értékelte a párizsi megállapodáshoz hasonló 1,5°C-os felmelegedési cél elérését, de az még költségesebb lenne.

A DICE későbbi kiadása a felmelegedésből eredő feltételezett károkat magasabb szinten veszi figyelembe, ami nem meglepő módon agresszívabb politikai ajánlásokhoz vezet, amint azt a széndioxid-kibocsátás társadalmi költségéről szóló alábbi szakaszban kifejtjük.

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adataalapú elemzése

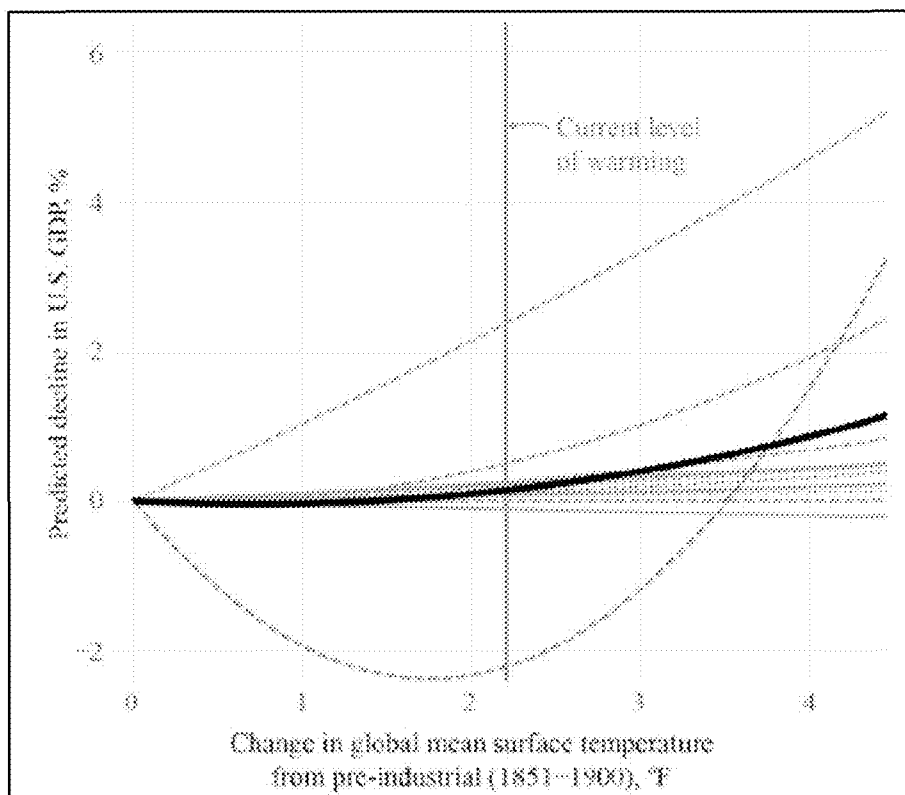
Számos más tanulmány éghajlatváltozás gazdasági növekedésre gyakorolt potenciális hatásának vizsgálatára az IAM-ek helyett atörténeti adatokra alkalmazott ökonometria módszereket használt az. Dell et al. (2012, a továbbiakban DJO12) egy nagyhatású tanulmány volt, ami egy több országra és a 1950 és 2005 közötti időszakra kiterjedő, nemzeti szintű adatokból álló panelt használt, amelyben az éghajlati és gazdasági adatokat a helyi rácscellák szintjétől a nemzeti szintig terjedő hőmérséklet átlagolásával párosították össze népességi súlyok segítségével. Azt találták, hogy a felmelegedés a gazdag országokban jelentéktelen pozitív hatással van a jövedelemnövekedésre, de a szegény országokban jelentős negatív hatással jár. Moore és Diaz (2015) módosították a DICE modellt, hogy figyelembe vegyék ezt a megállapítást, és arra a következtetésre jutottak, hogy a jövedelemkiesés időbeli összetett hatásai miatt a széndioxid-kibocsátás társadalmi költsége drámaian magasabb értékét jelenti.

A későbbi nagyszámú szakirodalom vitatta a DJO12 megállapításainak robusztusságát. Burke et al. (2015) egy olyan globális panelt elemzett, amelynek átlaghőmérsékletei országos szintre voltak átlagolva, és azt találták, hogy a felmelegedés negatív hatással van a növekedésre mind a gazdag, mind a szegény országokban, amikor az országos átlaghőmérséklet meghaladja a 13°C-ot. Zhao et al. (2018) Nordhaus (2006) G-Econ adatkészletét használta, ami a gazdasági aktivitást rácscella-szintre bontja le, és a DJO12-típusú eredményeket ugyanazon az országcsoporton ismételték meg, mint amilyeneket a DJO12-ben használtak, de ezután kimutatták, hogy a teljes globális mintán a felmelegedés mind a gazdag, mind a szegény országokban fokozza a növekedést, bár az utóbbi csoportban a pozitív hatás ott jelentkezik, ahol a helyi hőmérséklet körülbelül 16°C alatt marad. Greßer et al. (2021) egy regionális gazdasági adatkészletet fejlesztettek ki a világ 1542 szubnacionális régiójára vonatkozóan a 2005 és 2015 közötti időszakra, és azt találták, hogy a hőmérsékletnek nincs hatása a növekedésre. Yang et al. (2023) frissítette a DJO12 adathalmazt, és a mintavételi gyakoriság vegyességével szemben robusztusan viselkedő becslőt alkalmazott. Megállapították hogy bár a hőmérsékleti sokkok a jövedelmi szintre átmenetileg hatást gyakorolnak, a növekedési ütemre nézve nem volt jelentős és tartós következmény.

Newell et al. (2021) megjegyezte, hogy a szakirodalomban nincs olyan mögöttes elmélet, amely az ökonometria modellspecifikációt irányítaná. Figyelembe véve a magyarázó változók önkényes megválasztását, több mint 800 lehetséges modellspecifikációt azonosítottak. Burke et al. (2015) adatait felhasználva egy olyan becslési módszert alkalmaztak, amely figyelembe veszi a modell bizonytalanságát, és megállapították, hogy a Burke et al. (2015) által preferált modellformát (ami a növekedésre nézve még a gazdag országokban is felmelegedés negatív hatásait sugallta), az optimális modellkiválasztási algoritmus kifejezetten kizárja. Összességében nem tudtak kimutatni a GDP-re vagy a GDP-növekedésre gyakorolt hőmérsékleti hatást. A globális növekedésre gyakorolt hatás 95%-os konfidenciaintervallumát 2011-ra a túlzó RCP8.5 felmelegedési forgatókönyv szerint is -86 százaléktól +388 százalékgig terjedően becsülték. Más szóval, a nettó hatás valószínűleg pozitív, de túl bizonytalan ahhoz, hogy megkülönböztethető legyen a nullától.

Barker (2023) bírálta azon DJO12-feltételezést, hogy az országokat évtizedekkel ezelőtti jövedelmük alapján rögzített „szegény” és „gazdag” kategóriákba lehet csoportosítani. Megjegyezte, hogy sok ország egykor szegény volt, de idővel meggazdagodott, és ha ezt figyelembe vesszük, a Dell et al. által jelentett eredeti hőmérsékleti hatások kicsivé és jelentéktelenné váltak.

Berg et al. (2023) azzal érvelt, hogy az országokat nem szabad nagyvonalúan gazdag/szegény kategóriákba csoportosítani, mert túl heterogének. Ehelyett országspecifikus hőmérsékleti válaszreakciók együtthatókat becsülték meg, majd a hasonló válaszreakciók együtthatókkal rendelkező országokat kis panelekbe csoportosították. Külön becsülték meg a globális és az egyedileg jellemző helyi hőmérsékleti sokkokra adott válaszokat, hogy jobban azonosítsák az éghajlati jelet az időjárási adatokban. Összességében azt találták, hogy a felmelegedés növekedésre gyakorolt negatív hatását tapasztaló országok száma meghaladta a pozitív hatásokat tapasztalókat, de csak átmenetileg: a hatások végül megfordulnak, így körülbelül kétszer annyi ország tapasztal nettó pozitív növekedési hatást. Azt is megállapították, hogy sokkal valószínűbb, hogy a globális hőmérséklet-változások (szemben a helyiekkel) inkább a szegény országok növekedését segítik elő, mint a gazdagokét. Egy 2100-ig tartó szimulációban, még a szélsőséges RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazva is, kiszámolták, hogy az átlagos globális GDP-veszteség csak 1,9 százalék lenne a felmelegedés nélküli forgatókönyvhöz képest. Vagyis a gazdaság 400 százalékos növekedése helyett 392 százalékkal növekedne. Nordhaus korábbi elemzésének következménye, hogy a felmelegedés megakadályozására tett kísérletek jóval kevesebb, mint 392 százalékos növekedéshez vezetnének. Összefoglalva, a közgazdászok a klímát viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják a gazdasági növekedésben, ezt a nézetet maga az IPCC is megerősíti az ötödik értékelő jelentésében. A klímagazdaságtan főáramlatai felismerték, hogy a CO₂ által okozott felmelegedésnek lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik ahhoz, hogy az agresszív csökkentési politikát igazolni lehessen, és a globális felmelegedés „megállítására” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szinten is rosszabb lenne, mint a semmittevés. Egy nagyhatású 2012-es tanulmány azt sugallta, hogy a globális felmelegedés károsítaná a szegény országok növekedését, de a megállapítás később nem bizonyult megbízhatónak (Tol 2024). Azok a tanulmányok, amelyek teljes mértékben figyelembe veszik a modellezési bizonytalanságokat, vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására, vagy úgy találják, hogy a szegény országok ugyanolyan valószínűséggel profitálnak belőle, mint a gazdag országok.



11.2. ábra: Az Egyesült Államok GDP-jének csökkenése a felmelegedés foka szerint. Forrás: CEA-OMB (2023)

A Biden-kormányzat csendben tudomásul vette azt a várakozást, hogy a jelentős globális felmelegedés kis hatással lesz az amerikai gazdaságra, még akkor is, amikor az elnök klímavészhelyzetet hirdetett. A 2023-as CEA-OMB jelentésből származó 11.2. ábra az amerikai GDP várható csökkenését mutatja a hőmérséklet-emelkedés függvényében. A színes vonalak egy tucatnyi lektorált publikált tanulmány eredményeit mutatják, míg a folytonos fekete vonal ezek átlagát. Az adatot úgy lehetne összefoglalni, hogy „néhány százalékos hatás néhány fokos felmelegedés esetén”. Tekintettel arra, hogy a gazdaság éves növekedési üteme várhatóan 1-2 százalék lesz, a melegedő földgömb hatása az amerikai GDP-re valóban elhanyagolható.

11.2 Modellek a szén-dioxid társadalmi költségére (SCC)

A szén-dioxid társadalmi költsége (SCC) a szén-dioxid-kibocsátás gazdasági hatásának számszerűsítésére használt eszköz, amely segít a politikai döntéshozóknak mérlegelni a klímapolitikák költségeit és előnyeit. Becslést ad arra a kárra, amit egy tonna CO₂ többlet kibocsátása okoz, dollárban kifejezve. Formálisabban fogalmazva, az SCC a légkörbe jutó további CO₂-mennyiség miatti jelenlegi és jövőbeli gazdasági jóléti marginális veszteség diszkontált jelenértéke.

11.2.1 Az SCC becslése

Bár a szakirodalom az SCC „becsléseire” hivatkozik, azt nem úgy becsülik meg, ahogyan más gazdasági statisztikákat becsülnék. Például a piaci tranzakciókra vonatkozó adatok, beleértve az árakat és a mennyiségeket, felhasználhatók a jelenlegi inflációs ráta vagy az egy főre jutó reál GDP növekedési ütemének becslésére, és ezekhez a mennyiségekhez jól ismert bizonytalanságok tartoznak.

De nincsenek olyan piaci adatok, amelyekkel mérni lehetne a CO₂-kibocsátással feltételezett marginális károk vagy előnyök nagy részét (a legtöbbjét), ezért ezeket gazdasági modellek segítségével kell figyelembe venni.

Például egyes SCC-számítások befolyásoló eleme a szélsőséges időjárás miatti jövőbeni halálozási kockázat változásával járó észlelt társadalmi költség. Nincs olyan piac, ahol az emberek közvetlen árat rendelhetnének ehhez a kockázathoz. A közgazdászok legjobb esetben is megpróbálhatják kikövetkeztetni ezeket az értékeket a kapcsolódó piacokon, például ingatlanpiacon vagy biztosításokon lebonyolított tranzakciók vizsgálatával, de az árváltozásoknak és a légköri CO₂-szintnek tulajdonítható hatások elkülönítése nagyon nehéz.

A közgazdászok az SCC-t IAM-mal (integrált értékelési modellekkel) számítják ki. A két legismertebb a Bizonytalanság, Negatívum és Elosztás Éghajlati Keretrendszere (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution, „FUND”, Tol 1997) és Nordhaus DICE modellje. Az EPA (2023) újabban továbbiakat vezetett be. Az IAM-ek egy „kárfüggvényt” vagy függvénykészletet ágyaznak be, amely a környezeti hőmérsékletet hozzákapcsolja a helyi gazdasági viszonyokhoz. A kárfüggvénybe ágyazott feltételezések nagymértékben meghatározzák a kapott SCC-t. Az IAM-ek hosszú távú diszkontrátát is feltételeznek, vagy – mint a DICE-ban – a megoldás részeként kiszámítják az optimális belső diszkontrátát.

A kárfüggvény kidolgozásának egyik megközelítése az, hogy a világ országainak egyes ágazataiban a felmelegedés költségének (vagy hasznának) becslésével kezdik, és ezeket összesítik egy globális összegre. Ezt a megközelítést alkalmazták a FUND-ban is. Alternatív megközelítést jelent egy egyszerű egyenlet kidolgozása, ami a globális jövedelmet az átlagos globális hőmérséklet egyszerű kvadratikus függvénye szerint bünteti. Ezt a megközelítést alkalmazták a DICE modellben. A FUND modell esetében több száz paramétert kellett kiválasztani, míg a DICE modellben csak hármat. E hármat választották ki ahhoz, hogy a globális kibocsátáshoz 3°C-os felmelegedéstől kezdődően egy előre meghatározott büntetést (1,2%) rendeljenek, egy kvadratikus taggal, amely azt jelenti, hogy a károk a globális átlaghőmérsékleti anomália négyzetével arányosan nőnek. Barrage és Nordhaus (2024) a közelmúltban megváltoztatták a paramétereket, és a büntetést 3°C-on 1,6%-ra növelték, valamint 3°C-os felmelegedésnél további 1,0 százalékos GDP-büntetést adtak hozzá, hogy figyelembe vegyék a „fordulópontokat” (a felmelegedési küszöb átlépése által kiváltott hirtelen, nagyléptékű környezeti változásokat), valamint egy 0,5 százalékos „ítéleti korrekciót” a 3°C-os felmelegedés esetén kizárt hatásokra. Nem meglepő módon a DICE újabb verziója sokkal magasabb SCC-becslést generál, mint korábban.

A becslés és a bizonytalanság fogalmai nem alkalmazhatók azonnal az egyensúlyi klímaváltozás (SCC) számításaira. Semmilyen mennyiségű adatgyűjtés nem változtathat azon a tényen, hogy az SCC számos összetevője ismeretlen, és az éghajlatváltozás fizikai hatásairól szóló mögöttes szakirodalom ismeretén alapuló megítélésen és véleményen alapul. Az SCC-számításokat ezért legjobb „ha-akkor” állításoknak tekinteni: ha a következő feltételezések teljesülnek, akkor az SCC tonnánként X dollárt jelent. A „ha” állítások listája tartalmazza azt a feltételezést, hogy a világ éghajlata és gazdasága az IAM-ben leírtak szerint működik. Ennek egyik lehetséges oka a felmelegedés időzítése. Minden IAM feltételez az egyensúlyi klímaérzékenységre (ECS) egy olyan értéket, amely a CO₂-kibocsátásból eredő felmelegedés mértékét szabályozza, és szabadon változtatható az ECS-sel kapcsolatos bizonytalanságokkal társított SCC-értékek eloszlásának létrehozása céljából. De ahogy Roe és Baumann (2013) rámutattak, az egyensúlyi idő az ECS négyzetével nő, így az ECS-paraméter felfelé történő módosítása a beállítási folyamat megfelelő lassítása nélkül torz jelenérték-kárbecsléseket okozhat. Különösen a felmelegedés néhány gyakran használt ECS-eloszláshoz kapcsolódó felső tartománya, ami fizikailag még ezer év múlva is lehetetlen (Roe és Baumann 2013), egy IAM-ben mégis néhány évszázadon belül megvalósulna. Az ECS és az egyensúlyi idő összehangolásának elmulasztása az SCC értékének túlbecsléséhez vezet.

11.2.2 Az SCC változásai

Az IAM-számítás minden szintje feltételezéseket tartalmaz, némelyik befolyásosabb, mint mások. A főbb feltételezések a következők:

- A diszkontráta: Az éghajlati károk hosszú időhorizonton halmozódnak fel, és az egy-két évszázaddal későbbi költségeket a jelenre kell diszkontálni. Minél magasabb a diszkontráta, annál kisebb a jövőbeni károk jelenértéke, és fordítva. A diszkontráta a pénz ma történő elköltésének alternatív költségét jelenti ahelyett, hogy befektetnénk, majd holnap többet költenénk. Egyes közgazdászok az SCC-számításokban nagyon alacsony diszkontráták alkalmazása mellett érvelnek, ami olyan politikai ajánlásokhoz vezetett, amelyek a CO₂-kibocsátás csökkentésébe történő viszonylag nagy azonnali beruházásokat részesítik előnyben. A hátránya, hogy más beruházások potenciálisan nagyobb megtérülést hozhatnak a társadalom számára.
- Egyensúlyi klímaérzékenység: Az IAM-ek az IPCC útmutatásait követve szokásosan 3,0°C vagy 3,1°C értéket alkalmaztak. A legfrissebb, adatalapú ECS-értékek általában ennél alacsonyabbak (lásd a 4. fejezetet). Dayaratna et al. (2017, 2020, 2023) kimutatták, hogy az alacsonyabb, empirikusan származtatott ECS-értékek használata drámaian csökkenti a kapott SCC-becslést, még alacsony diszkontráták alkalmazása esetén is.
- Kárfüggvény-együtthatók: Az IAM-ek feltételezik, hogy a CO₂ és a felmelegedés nettó károkozók, és a károk a hőmérséklettel exponenciálisan nőnek. Az újabb IAM-ekbe a feltételezett potenciális éghajlati fordulópontok hatásait is beépítették. A FUND modell korlátozottan, de explicit módon figyelembe vette a CO₂-trágyázás hatásait a mezőgazdaságban. Mivel az együtthatókat a globális zöldülés jelenlegi bizonyítékainak és a megnövekedett CO₂-szintből a növényekre gyakorolt előnyök nagyságának közzététele előtt választották ki (lásd a 2. és 9. fejezetet), a növekedési hatásokat valószínűleg alábecsültek. A DICE modell (és mások) nem tartalmaztak explicit módon semmilyen CO₂-trágyázási előnyt, kivéve, ha azt a kárfüggvény-együtthatók kiválasztásakor a felhasznált szakirodalomban figyelembe vették. A FUND kárfüggvénye tartalmaz egy olyan régiót, amelyben az alacsony felmelegedés számos régióban nettó előnyöket eredményez, e megállapítást alátámasztják a felmelegedés és növekedés ökonometriai modelljei (Berg et al. 2023), valamint a mezőgazdasági változások ökonometriai szimulációi (McKittrick 2025). A DICE kárfüggvény - felépítéséből adódóan - bármilyen felmelegedési szinten kizárja a nettó előnyöket.
- Emissziós forgatókönyvek: Az IAM-ok olyan SCC-becsléseket generálnak, amelyek a meglévő CO₂-koncentráció emelkedésével nőnek. Következésképpen a károk értéke az évszázad későbbi szakaszában magasabb lesz, az elkövetkező évtizedekben feltételezett alapkibocsátásoktól függően.

Néhány integrált modell (mint például a DICE) tartalmazza a CO₂-kibocsátáscsökkentés gazdaságra gyakorolt költségeit, hogy meghatározzon egy optimális növekedési pálya menti SCC-t. Ha a CO₂-kibocsátás csökkentését olcsónak feltételezzük, akkor a modell arra a következtetésre jut, hogy az optimális politikának a nagyobb kibocsátáscsökkentésre kell törekednie, és fordítva.

Informatív megállapítás, hogy az SCC eredményei invariánsak-e bizonyos feltételezések változásaival szemben. De amikor különféle feltételezések magasabb vagy alacsonyabb SCC-értékeket eredményeznek, az SCC-érték változása nem szolgáltat elsődleges bizonyítékot a feltételezések érvényességére. Például 2023-ban az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége körülbelül ötszörösére emelte az általa preferált SCC-értéket a tíz évvel korábban kiadott becslésekhez képest. Ez nem azért van, mert új adatokat gyűjtöttek, vagy jobb matematikai módszereket találtak fel, hanem azért, mert új feltételezéseket alkalmaztak, és ezeknek a feltételezéseknek az érvényessége mindettől független kérdés. Az EPA (2023) 81. oldalán található táblázatok azt mutatják, hogy ha a korábbi elemzésekhez hasonló feltételezéseket alkalmaztak volna, az eredmények nem különböztek volna lényegesen a korábbiaktól. Az egyik új feltételezésük az volt, hogy Moore et al. (2017) elemzése alapján a globális mezőgazdasági károk a korábban vélténél jóval nagyobbak. De ahogy a 9. fejezetben tárgyaltuk, McKittrick (2025) kimutatta, hogy Moore et al. (2017) egy olyan adatbázist használt,

amelyben a CO₂-változási megfigyelések fele hiányzott. Amikor a lehető legtöbb megfigyelést újra figyelembe vették a rendelkezésre forrásokból, és az elemzést megismételték, a várható terméshozam-veszteségek eltűntek, és minden felmelegedési szinten nyereséggé alakultak. Ezért az EPA SCC-felülvizsgálatában a mezőgazdasági terméshozamnak tulajdonított veszteséggel foglalkozó rész alaptalan volt.

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

A 2. fejezet áttekintette a klímaváltozással és a zöldítéssel kapcsolatos bizonyítékokat, a 9. fejezet pedig az éghajlatváltozást és az amerikai mezőgazdaságot vizsgálta. A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂-trágyázás sokkal jótékonyabb hatással van a mezőgazdaságra, mint azt akkoriban tudták, amikor az olyan IAM-eket, mint a DICE és a FUND paraméterezték. Haverd et al. (2020) azt találta, hogy a megfigyelt CO₂-trágyázási arány majdnem kétszerese volt a termésmoделlek által előrejelzettnek. Dayaratna et al. (2023) Lewis (2022) frissített - modern műszeres és paleoklíma-hőmérsékleti adatokat asszimiláló - empirikus ECS-eloszlásbecslését használta, és a FUND modellben 30 százalékos CO₂-trágyázási haszonnövekedést vette figyelembe. Úgy találta, hogy 2050-re a medián SCC még alacsony, 2,5 százalékos diszkontráta mellett is mindössze 18,67 dollár, a valódi érték 24 százalékos valószínűséggel negatív. Öt százalékos diszkontráta mellett a medián SCC-érték a 2040-es évek közepéig negatív, 2050-ben pedig csak 0,37 dollár volt, 49 százalékos valószínűséggel negatív. Így ésszerű feltételezések mellett a frissített tudományos adatokat használó mainstream IAM olyan bizonyítékot szolgáltat, amely alátámasztja azt, hogy az SCC nem szignifikánsan nagyobb nullánál.

Azt is meg kell jegyezni, hogy az SCC a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó CO₂-kibocsátás társadalmi költségeire összpontosít. Nem célja a fogyasztók és a társadalom számára a fosszilis tüzelőanyagok elérhetőségéből származó magán-határhasznok mérése. A lakosság hajlandósága arra, hogy bármilyen típusú üzemanyagért fizessen, a megbízható, bőséges fosszilis energia társadalmi értékét jelzi. Tol (2017) becslése szerint a szén-dioxid egyéni haszna a társadalmi költségekhez képest nagy. Szemléltetésül: egy gallon benzin ára az üzemanyag fogyasztója számára jelentkező határértékét jelzi. Tegyük fel, hogy a szén-dioxid társadalmi költségét viszonylag magasnak tekintjük, mondjuk tonnánként 75 dollárnak. Deflálva egy 1,5-ös MCPF⁴ értékkel, ami tonnánként 50 dolláros szén-dioxid-adót eredményezne, benzin esetén megfelelne 44 cent/gallonnak (Lavelle, 2019). A adózás előtti 3,00 dollár/gallon ár azt jelentené, hogy az üzemanyag társadalmi határköltsége közel hétszerese a társadalmi határköltségnek.

11.2.4 Fordulópontok

Az SCC-számítások jellemzően a melegedő éghajlat fokozatos hatásait veszik figyelembe, mint például a lassan olvadó gleccserek és az emelkedő átlaghőmérséklet. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségének (SCC) potenciálisan magas értékeiben az egyik mozgatórugó a hirtelen változásokhoz kapcsolódó hirtelen katasztrofális következmények bevezetése a modellekbe (Dietz et al., 2021). Ezeket gyakran nevezik „fordulópontoknak” vagy billenőpontoknak.

A „fordulópont” kifejezés két eltérő fizikai fogalmat ötvöz, amelyek különféle kutatási kihívásokat jelentenek. Sok fizikai rendszer eredendően stabil, hacsak nem hat rá elegendően nagy külső energia. Például egy jégsapka széles hőmérsékleti tartományban érintetlen maradhat, de amint a hőmérséklet átlépi a 0°C-os küszöböt, elolvad. Az ilyen hirtelen átmenetek mindenütt jelen vannak a természetben, és külső erőt igényelnek. Az, hogy az erőnek a rendszer méretéhez képest nagynak kell-e lennie, a rendszer mögöttes stabilitásától függ.

⁴A közpénzek határköltsége: az optimális szén-dioxid-adóhányad az SCC osztva az MCPF-vel (Sandmo 1977).

Egy másik típusú fordulópontnak a neve bifurkáció, ami a nemlineáris rendszerek belső dinamikájának tanulmányozásából származik (Crawford, 1991). Számos rendszerről megfigyelték, hogy egynél több egyensúlyi ponttal rendelkezik, amelyek között minimális külső befolyással vagy akár anélkül is átmozdulhat. Például egy időjárás rendszernek két különböző egyensúlyi állapota lehet: az egyikben szélesend van, a másikban pedig tornádó. Az egyikből a másikba való átmenet külső erőhatás nélkül vagy apró változással is megtörténhet, például a közmondásos pillangó szárnycsapásával (Shen et al. 2014). A „fordulópont” kifejezést néha az ilyen típusú bifurkációra használják, ami magában a rendszerben rejlő, külső erőktől nem feltétlenül függő instabilitást sugall. Ehelyett a rendszer paramétereitől függ, amelyek olyan értékeket vesznek fel, amelyek alátámasztják a bifurkációk kialakulását (Crawford, 1991).

A két eltérő koncepció különböző kutatási kérdéseket vet fel. Az elsővel kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az éghajlati rendszer összetevői kellően nagy antropogén kényszer hatására érzékenyek-e hirtelen változásokra. A másodikkal kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy a Föld éghajlati rendszerének vannak-e olyan eredendő bifurkációi, amelyek külső kényszer hatására vagy anélkül hirtelen átmeneti lehetőséget jelenthetnek.

Olyan modelleket fejlesztettek ki, amelyek arra utalnak, hogy a második típus is lehetséges. Kypke et al. (2020) egyszerű éghajlati modelljében az üvegházgáz-koncentráció egyike azon paramétereknek, amelyek az arktiszi éghajlat olyan bifurkációinak kialakulását szabályozza, amelyben hideg és meleg egyensúly is lehetséges. Ha kellően magas üvegházgáz-kényszert és kellően magas óceáni hőszállítási sebességet hoznak létre, akkor lehetővé válik a bifurkáció. Általánosabb megfigyelés szerint a globális klímaváltozási rendszerek bifurkációkat és többszörös egyensúlyokat tartalmaznak (Brunetti és Ragon, 2023).

A bifurkációk esetleges létezése a Föld éghajlati rendszerében azt jelenti, hogy hirtelen átmenetek lehetségesek, nemcsak nagy kényszerítésekre, hanem kis perturbációkra is. Ez a fordulópontokat az olyan alacsony valószínűségű és potenciálisan katasztrofális események kategóriájába sorolja, mint például egy nagy meteorbecsapódás. Kulcsfontosságú kérdés, hogy vajon az ilyen típusú fordulópontok előre jelezhetők-e. A jelenlegi kutatások nem oldották meg ezt a kérdést (Dakos et al., 2024), és valószínűleg nem is lesznek képesek rá, mivel a „pillangóhatás” egyik következménye, hogy a nemlineáris rendszerekben kiszámíthatósági határok léteznek (Palmer et al., 2014). Ezért nem nyilvánvaló, hogyan lehet ezeket a lehetőségeket beépíteni az SCC-számításokba. A feltételezések kis eltérései a kapott SCC-ben önkényesen nagy eltérésekhez vezetnek, és nincs alapunk választani közöttük. Ha ilyen fordulópontok lehetségesek, a gazdaságpolitika legmegfelelőbb álláspontja a külső katasztrófákkal szembeni ellenálló képesség maximalizálása, mivel nem valószínű, hogy meg tudnánk jósolni vagy meg tudnánk akadályozni a bekövetkezést. Az AR6 (WGI, 1. fejezet) főként az első típusú fordulópontokra összpontosít, nevezetesen a külső kényszerre adott hirtelen változásra. Ez a jelentés jár együtt a „fordulópont” fogalmának népszerű használatával is az éghajlatváltozással kapcsolatos vitákban (lásd például itt: <https://report-2023.global-tipping-points.org/what-is-a-tipping-point/>). Ahogyan az AR6 összefoglalja, a paleoklíma-adatokban vannak hirtelen változásokra utaló jelek, és ezek közül néhányat fordulópontként értelmeztek. Egyes földrendszer-modellekkel végzett előrejelzések olyasféle fordulópontokat adtak ki, mint például az amazonasi erdők pusztulása a CO₂-koncentráció, illetve a hőmérséklet meghatározott értékére etörtendő emelkedése esetén.

Éghajlati fordulópontokat övező riadalom tükröződik a Globális Fordulópontokról szóló 2023. december 6-án a COP28 konferencián közzétett jelentésben (Lenton et al., 2023). A jelentés az éghajlati rendszer több mint 25 olyan részét azonosítja, amelyekről azt mondják, hogy fordulópontokat alkotnak. Amit éghajlati „fordulópontnak” minősítenek, az egy mozgó célpont. A szakirodalomban és az értékelő jelentésekben szereplő leggyakoribb példák közé tartozik a grönlandi jégtakaró szétesése, a nyugat-antarktiszi jégtakaró szétesése, az északi-sarki tengeri jég nyári eltűnése, az amazonasi esőerdők elpusztulása, a korallzátonyok pusztulása, az örökfagy és a metánhidrátok felengedése, az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása, a boreális erdők eltolódása, a nyugat-afrikai monszun eltolódása és az indiai monszun eltolódása.

Minden efféle fordulóponthoz bizonyos fokú rendszerinstabilitás szükséges, hogy felmelegedésre hirtelen átmenetet mutathozzon. Emiatt úgy tűnik, nagyon kevés különbséget lehet tenni a fordulópont és a természetes éghajlati változékonyság között. A természetes éghajlati változékonyság a múltban eltolódásokat okozott a nyugat-afrikai és indiai monszunokban, pusztítást az amazonasi erdőkben és a korallzátonyokban, valamint szétesést a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégtakarók egyes részeiben. E hatások a természetes éghajlati változékonyság és az ökoszisztéma-válaszok évtizedes és évszázados időléptékeiben mind visszafordíthatók.

Súlyosabb következmények lehetőségét hordozza néhány olyan hirtelen lehetséges változás, mint a nyugat-antarktiszi jégtakaró összeomlása és az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása. Az AR6 WG1 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalója szerint:

Az Atlanti Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) a 21. században minden kibocsátási forgatókönyv esetén nagy valószínűséggel gyengülni fog. Míg a 21. századi csökkenést *nagy valószínűséggel* valószínűsítik, a trend nagyságrendjét illetően csak *alacsony* a bizalom. *Közepes a bizalom* abban, hogy 2100 előtt nem lesz hirtelen összeomlás. (C.3.4)

Korlátozott bizonyítékok szerint bekövetkezhetnek kis valószínűségű, nagy hatású kimenetek (amilyeneket pl. mély bizonytalansággal jellemzett, egyes esetekben fordulópontokat is érintő jégtakaró-instabilitási folyamatok okoznak), amelyek magas ÜHG-kibocsátású forgatókönyvek (pl. SSP5-8.5) esetén évszázadokra jelentősen növelnék az antarktiszi jégvesztésüket. (B.5.2)

SCC-számítások esetében az ilyen típusú fordulópont által implikált kutatási kérdés az, hogy vajon megfigyeltek-e már efféle eseményeket a múltban a jelenleg tapasztalathoz hasonló éghajlati körülmények között, vagy a közeljövőben fognak-e ilyen észlelni. Az AR6 kevés bizonyítékot talál az Atlanti-óceáni Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) vagy a Nyugat-Antarktiszi jégtakaró közelgő összeomlására. Megállapítja viszont, hogy az Északi-sarki tengeri jéghez nem kapcsolódik fordulópont (AR6 Műszaki Összefoglaló, 76. o.)

Dietz et al. egy SCC-modellbe számos potenciális fordulópontot (hirtelen változást) épített be. Úgy találták, hogy körülbelül 25 százalékkal emelték a becslést, főként az örökfagy olvadásával és a metánhidrátok felszabadulásával összefüggésben. Az IPCC azonban ezt a forgatókönyvet nagyon valószínűtlennek tartja (AR6 Technikai Összefoglaló, 107. o.).

Összefoglalva, következhetnek be a természetes éghajlati folyamatokhoz kapcsolódó ismeretlen bifurkációs fordulópontok, de ez a lehetőség nem fordítható le konkrét útmutatásként az SCC-re vonatkozóan. Előfordulhatnak a felmelegedés következményeként a klímarendszerben potenciálisan hirtelen változási pontok, bár az IPCC a legtöbbhöz, beleértve a legnagyobbakat is, alacsony valószínűséget rendel. Ha mindezeket figyelembe vesszük, eredményül azt kapjuk, hogy az SCC értéke a 21. században csak szerény mértékben nő.

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

Egyre inkább azt állítják, hogy az SCC-ben túlságosan nagy változások vannak ahhoz, hogy az hasznos legyen a politikai döntéshozók számára. A Cambridge Econometrics (Thoung, 2017) kijelentette, hogy a bizonytalanságok miatt „itt az ideje kinyírní”. Az Egyesült Királyság és az EU már nem használja az SCC-t a szakpolitikai értékeléshez, és a „célokkal konzisztens” szén-dioxid-árazást választja (UK Department for Energy Security and Net Zero 2022, Dunne 2017). Az SCC-becslések bizonytalansága azonban nem jelenti azt, hogy az egyéb szabályozási eszközök eredendően jobbak vagy hatékonyabbak lennének. Számos kibocsátási szabályozás (például az elektromos járművekre vonatkozó előírások, a megújuló energiaforrásokra vonatkozó előírások, az energiahatékonysági előírások és bizonyos típusú háztartási gépek tilalma) tonnánként sokkal nagyobb

kibocsátáscsökkentési költséget okoz, mint bármely általános SCC becslés, ami elegendő annak megállapításához, hogy a költség-haszon tesztnek egyikük sem felel meg.

Hivatkozások

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar, K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan (2014) Key economic sectors and services. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659-708. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf
- Barker, D. (2023) Temperature Shocks and Economic Growth: Comment on Dell, Jones, and Olken. *Econ Journal Watch* 20(2) 234-253 <https://econjwatch.org/articles/temperature-shocks-and-economic-growth-comment-on-dell-jones-and-olken>
- Barrage, Lint and William Nordhaus (2024) Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121 (13) e2312030121 <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>
- Berg, Kimberly, Chadwick C Curtis and Nelson Mark. (2021) GDP and temperature: Evidence on cross-country response heterogeneity. NBER Working Paper 31327 June 2023 <http://www.nber.org/papers/w31327>
- Blickle, Kristian; Sarah N. Hamerling, and Donald P. Morgan (2021) : How bad are weather disasters for banks?, Staff Reports, No. 990, Federal Reserve Bank of New York, New York, NY <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/247913/1/sr990.pdf>
- Brunetti, Maura and Charline Ragon (2023) Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. *Physical Review E* 107 054214 <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.054214>
- Burke, Marshall, Solomon M Hsiang, and Edward Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577):235–239.
- Council of Economic Advisors-Office of Management and Budget (CEA-OMB 2023) Methodologies and considerations for integrating the physical and transition risks of climate change into macroeconomic forecasting for the president's budget. March 13, 2023. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf>
- Crawford, John D (1991) Introduction to Bifurcation Theory. *Reviews of Modern Physics* 63(4) October 1991 991—1037.
- Dakos, Vasilis, Chris Boulton, Joshua Buxton et al. (2024) Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics* 15 1117—1135 <https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024>
- Dayaratna, Kevin and Ross McKittrick (2023) "Reply to comment on "climate sensitivity, agricultural productivity and the social cost of carbon in fund" by Philip Meyer" *Environmental Economics and Policy Studies* 2023 link.springer.com/article/10.1007/s10018-023-00364-2
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American economic journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95, 2012. ISSN 1945-7707.

- Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner (2021) Economic impact of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Science* 2021 Vol. 118 No. 34 e2103081118
- Dunne, Daisy (2017), “Q&A: The Social Cost of Carbon,” *Carbon Brief*, February 14, 2017, <https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/>
- Formetta, Giuseppe and Luc Feyen (2019) Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Global Environmental Change* 57 101920 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.004>
- Greßer, Christina, Daniel Meierrieks, and David Stadelmann (2021) The link between regional temperature and regional incomes: econometric evidence with sub-national data. *Economic Policy*, 36(107):523–550, 2021.
- Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402.
- Hu, Bin and Ross McKittrick (2015) Climatic Variations and the Market Value of Insurance Firms. *Journal of Insurance Issues* Vol. 39, No. 1, pp. 92-111 <https://www.jstor.org/stable/43741103>
- Kypke, K. L., Langford, W. F., and Willms, A. R.: Anthropocene climate bifurcation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 27, 391–409, <https://doi.org/10.5194/npg-27-391-2020>, 2020.
- Lavelle, Marianne (2019) Carbon Tax Plans: How They Compare and Why Oil Giants Support One of Them. *Inside Climate News* March 7, 2019 <https://insideclimatenews.org/news/07032019/carbon-tax-proposals-compare-baker-shultz-exxon-conocophillips-ccl-congress/>
- Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, et al. (eds) (2023) *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK. <https://report-2023.global-tipping-points.org/>
- Lewis, N., (2013) An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. *Journal of Climate*, 26, 7414-7429. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00473.1>
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mohaddes, Kamiar, Ryan Ng., Hashem Psaran, Mehdi Raissi and Jui-Chung Yang (2023) Climate change and economic activity: evidence from US states. *Oxford Open Economics* Vol 2 odac010 <https://doi.org/10.1093/ooec/odac010>
- Moore, Frances C. and Delavane B. Diaz (2015) Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2):127–131, 2015. ISSN 1758-678X.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Newell, Richard G., Brian C. Prest, and Steven E. Sexton (2021). The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108 <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445>
- Nordhaus, William (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10):3510–3517, 2006. ISSN 0027-8424.
- Nordhaus, William. (2018) Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* August 2018, 10(3): 333-360. <https://pubs.acaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model *American Economic Review* Vol. 83, No. 2, (Papers and Proceedings) pp.313-317.
- O'Neill, Brian C. (2023) Envisioning a future with climate change. *Nature Climate Change* 13, pages 874–876 <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01784-4>
- Palmer, TN, A Döring and G Seregin (2014) The real butterfly effect. *Nonlinearity* 27(9) 10.1088/0951-7715/27/9/R123 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/27/9/R123/meta>
- Pielke Jr., Roger (2018): Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, *Environmental Hazards*, DOI: 10.1080/17477891.2018.1540343

- Pielke Jr., Roger (2020) Economic ‘normalisation’ of disaster losses 1998–2020: a literature review and assessment,” *Environmental Hazards*, 2020, pp. 1-19
- Pielke Jr., Roger (2023) Global disaster losses: 1990-2023 Substack essay
<https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>
- Resources for the Future (2025) “Social Cost of Carbon Explorer,” Resources for the Future website, accessed April 22, 2025, <https://www.rff.org/publications/data-tools/scc-explorer/>.
- Roe, Gerard H. and Yoram Bauman (2013) Climate Sensitivity: Should the climate tail wag the policy dog? *Climatic Change* (2013) 117:647–662 DOI 10.1007/s10584-012-0582-6
- Sandmo, Agnar (1975) “Optimal Taxation in the Presence of Externalities.” *Swedish Journal of Economics* 77 (1), 86–98.
- Schelling, Thomas C (1992) Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 82 (1):1–14.
- Shen, Bo-Wen, Roger A Pielke Sr and Xubin Zeng (2023) The 50th Anniversary of the Metaphorical Butterfly Effect since Lorenz (1972): Multistability, Multiscale Predictability, and Sensitivity in Numerical Models. *Atmosphere* 2023 14(8) <https://doi.org/10.3390/atmos14081279>
- Storm, S (2017) “How the Invisible Hand is Supposed to Adjust the Natural Thermostat: A Guide for the Perplexed.” *Science and Engineering Ethics* vol 23: 1307—1331.
- Thoung, Chris (2017) “Is It Time to Kill Off the Social Cost of Carbon?” *Cambridge Econometrics Blog*, September 14, 2017, <https://www.camecon.com/blog/time-kill-social-cost-carbon/>.
- Tol, Richard S.J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND Environmental Modeling and Assessment 2: 151—163.
- Tol, Richard S.J. (2017). "The Private Benefit of Carbon and its Social Cost," Working Paper Series 0717, Department of Economics, University of Sussex Business School.
<https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html>
- Tol, Richard S.J. (2024) A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy* 185 113922 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>
- UK Department for Energy Security and Net Zero (2022). “Carbon Valuation.” GOV.UK, last updated April 4, 2022. <https://www.gov.uk/government/collections/carbon-valuation--2>.
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, November 2023,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
 accessed February 28, 2024.
- Yang, Yimin, Fei Jia, and Haoran Li. Estimation of panel data models with mixed sampling frequencies (2023). *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 85(3):514–544.
- Zhao, Xiaobing, Mason Gerety, and Nicolai V. Kuminoff (2018) Revisiting the temperature-economic growth relationship using global subnational data. *Journal of environmental management*, 223:537–544, 2018.

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

Fejezet-összefoglaló

Az USA politikai intézkedéseinek várhatóan észrevehetően kicsiny közvetlen hatása lesz a globális éghajlat alakulására, és minden egyes hatás csak nagyon hosszú idő elteltével jelentkezik.

12.1 A léptékprobléma

A kritikus légszennyező anyagok kibocsátási rátái és légköri koncentrációi szorosan összefüggenek, mivel élettartamuk rövid, koncentrációjuk pedig kicsi; tehát amikor a lokális kibocsátás csökken, a lokális szennyezőanyag-koncentráció gyorsan csökken, általában néhány napon belül. A globális átlagos CO₂-koncentráció azonban egészen másképp viselkedik, mivel a kibocsátások globálisan keverednek, továbbá a globális szén ciklus hatalmas és lassú. A lokális CO₂-kibocsátás bármilyen változása ma csak nagyon kis globális hatással jár, és csak hosszú időkéssleltetéssel.

A CO₂ légkörbe történő kibocsátását követően a többlet CO₂-nek csak körülbelül 40±15 százaléka kötődik meg húsz év alatt. Ez a hányad ezer év után 75±10 százalékra emelkedik, a fennmaradó rész pedig fokozatosan eltávolításra kerül az azt követő több tízezer év folyamán (Ciais et al., 2013, 472-473. o.). Következésképpen az amerikai kibocsátások bármilyen csökkentése csak mérsékelten lassítaná, de nem akadályozná meg a globális CO₂-koncentráció emelkedését. És még ha a globális kibocsátások holnap meg is állnának, évtizedekbe vagy évszázadokba telne, mire a globális CO₂-koncentráció, és így az éghajlatra gyakorolt emberi hatások érdemi csökkenését tapasztalnánk.

A légköri CO₂-készlet csökkentése megkövetelné, hogy a kibocsátás a természetes megkötési ráta alá csökkenjen, feltételezve, hogy a teljes növekedés antropogén. Mivel ez a ráta az elmúlt évtizedekben a kibocsátás átlagosan körülbelül 50 százalékát tette ki, a globális kibocsátás 50 százalékos csökkentése (legalábbis ideiglenesen) megállítaná a légköri CO₂ növekedését. Az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv azt javasolta, hogy az ipari országok CO₂-kibocsátását 2012-re az 1990-es szinthez képest szerény, öt százalékos csökkentési szinten korlátozzák. Bár ezt a politikát a legtöbb ország számára túl nehéz volt megvalósítani, a teljes betartás a légköri CO₂-szintet nem csökkentette volna jelentősen. Csak kismértékben lassította volna a CO₂ növekedését, úgy, hogy a 2100-as évre előre jelzett szintet 2105-re érénk el (Wigley, 1998). Lomborg (2016) becslése szerint a Párizsi Megállapodásban vállalt kezdeti kötelezettségek teljes betartása nem állítaná meg a felmelegedést, csupán körülbelül 0,1 Celsius-fokkal akadályozná meg a felmelegedést, és körülbelül egy évtizeddel késleltetné a 2100-as alaphőmérsékleti szint elérését.

Így a hagyományos légszennyezés-szabályozással ellentétben még a drasztikus helyi intézkedéseknek is elhanyagolható helyi hatásai lesznek, és az is csak hosszú időkéssleltetéssel. Az a gyakorlat, hogy az egyoldalú amerikai csökkentéseket „éghajlatváltozás elleni küzdelemnek” vagy „éghajlatváltozás elleni fellépésnek” nevezik, és azt feltételezik, hogy képesek vagyunk megállítani az éghajlatváltozást, a probléma mértékének mély félreértését tükrözi.

12.2 Esettanulmány: Az USA-gépjárművek kibocsátása

A léptékprobléma az amerikai gépjárművek példáján keresztül jól illusztrálható. Az EPA 2009-es veszélyeztetettségi megállapítása az Egyesült Államokban a személygépkocsik és a könnyű tehergépkocsik CO₂-kibocsátására összpontosított, mivel a Tiszta Levegő Törvény 202(a) szakasza felhatalmazza az EPA-t, hogy kibocsátási szabványokat határozzon meg a gépjárművek számára, ha a szennyező anyagokról kiderül, hogy veszélyeztetik a közegészséget vagy a jólétet. A 2009-es veszélyeztetettségi megállapítás ezért kötelezte az EPA-t az új gépjárművek kibocsátásának szabályozására, látszólag az amerikai lakosságot érő éghajlatváltozással kapcsolatos károk csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében.

Két természetesen felmerülő kérdés: (1) Mekkora CO₂-kibocsátáscsökkenést eredményezne egy ilyen szabályozás? és (2) Milyen lenne egy ilyen szabályozás éghajlati hatása?

Az első kérdésre úgy lehet válaszolni, hogy az amerikai járművek CO₂-kibocsátását összehasonlítjuk a globális összkibocsátással. A második kérdésre az a tény válaszolható, hogy a globális felmelegedés csökkenése az EPA által használt modellek szerint arányos lenne a globális kibocsátások csökkenésével, szem előtt tartva, hogy a légkör CO₂-tartalmának változása egy adott évben a teljes globális CO₂-kibocsátás eredménye, nem csak az amerikai kibocsátásé.

2022-ben az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik kibocsátása összesen 1,05 milliárd tonna szén-dioxidot tett ki (GtCO₂, EPA 2024). Eközben az energiafelhasználásból származó globális CO₂-kibocsátás összesen 34,6 GtCO₂ volt (Energy Institute 2024). Ezért az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik a globális energiával kapcsolatos CO₂-kibocsátásnak mindössze 3,0 százalékát teszik ki. Első közelítésben azt mondhatjuk, hogy még az összes amerikai járműalapú kibocsátás megszüntetése is egy-két évvel késleltetné a CO₂ felhalmozódását a légkörben egy évszázad alatt.

Ami az általános felmelegedési trendet is legfeljebb körülbelül 3 százalékkal csökkentené. Az 1979–2023 közötti időszakra, amely a legkiterjedtebb globális lefedettséggel rendelkezik az időjárási adattípusok közül, a felmelegedési trendeket körülbelül ± 15 százalékos pontossággal határozzák meg, így az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának megszüntetésével a globális felmelegedés ütemének csökkentésének hatása messze a mérhetőség határai alatt lenne. Tekintettel arra, hogy a globális átlaghőmérséklet a legközvetlenebb klímaváltozási mérőszám, az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának csökkentéséből eredő, a másodlagos klímaputatókra (pl. súlyos időjárás, árvizek, aszály stb.) gyakorolt hatások még kevésbé lennének mérhetők.

Következésképpen, a helyi légszennyező anyagokkal (például apró részecskék és ózon) szemben hozott intézkedésekkel ellentétben, az amerikai járművek ÜHG-kibocsátására vonatkozó legagresszívabb szabályozási intézkedésektől sem várhatók el, hogy mérhető mértékben orvosolják az amerikai lakosságra leselkedő állítólagos klímaveszélyeket.

12.3 Zárógondolatok

E jelentés a klímapolitika tájékoztatása céljából árnyalt és bizonyítékokon alapuló megközelítést részesít előnyben, amely megközelítés kimondottan elismeri a bizonytalanságokat. A természetes és emberi hatások hatására bekövetkező éghajlatváltozás kockázatait és előnyeit össze kell mérni az „éghajlati intézkedések” költségeivel, hatékonyságával és járulékos hatásaival, figyelembe véve az ország megbízható és megfizethető energiára való igényét, a lehető legkisebb helyi szennyezés mellett. A globális éghajlati rendszer folyamatos, pontos, megszakítás nélküli megfigyelésén túl nagyon fontos, hogy reális feltételezéseket tegyünk a jövőbeli kibocsátásokkal kapcsolatban, az elfogultságok és bizonytalanságok kezelése érdekében újraértékeljük az éghajlati modelleket, és egyértelműen elismerjük el a szélsőséges események attribúciójával (oktulatárával) foglalkozó tanulmányok korlátait. A megalapozott és hatékony döntéshozatalhoz elengedhetetlen egy olyan megközelítés, amely a hibás modellekre és szélsőséges forgatókönyvekre való támaszkodás helyett elismeri a CO₂ potenciális kockázatait és előnyeit is.

Hivatkozások

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

EPA (2024) Fast Facts: U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022. Available online at <https://nepis.epa.gov/Exec/ZyPDF.cgi?Dockkey=P101AKR0.pdf>

- Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Available online at <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Lomborg, Bjorn (2016) “Impact of Current Climate Proposals” *Global Policy* 7(1) 109—118. Available at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1758-5899.12295/full>.
- Wigley, T.M.L. (1998). “The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications.” *Geophysical Research Letters* 25(13), 2285-2288

SZÓJEGYZÉK

2XCO₂: A légköri szén-dioxid (CO₂) megduplázódása, az éghajlatváltozás kezelésének általánosan használt alapértéke. 2025-ben a légköri CO₂-koncentráció körülbelül 50 százalékkal csökkent a 2XCO₂-hoz képest az 1800-as értékhez képest.

ACE (összegzett ciklonenergia): A trópusi ciklon élettartama alatt felhalmozódott energia statisztikai jellemzője; a maximális tartós szélsőségek-négyzetek összegzéséből számítják ki.

ACRIM (Aktív Üregradiométer Besugárzás Monitor) GAP: A teljes napsugárzási adatsorban az 1989 és 1991 közötti adathiány, amit az előző rendszerrel való átfedés és interkalibráció érdekében szükséges műholdas megfigyelő rendszer elindításának késése okozott.

AEROSZOL: A levegőben lebegő apró szilárd vagy folyékony részecskék sokasága.

AMO: Atlanti Többévtizedes Oszcilláció, a tengerfelszín-hőmérséklet 60 éves ciklusa az Atlanti-óceán északi részén.

ANTROPOGÉN: Emberek általi.

AR (Értékelő Jelentés): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület által közzétett időszakos értékelés, amelyek az éghajlati rendszerről, a globális változásról és a kapcsolódó kérdésekről szóló jelenlegi ismereteket értékelik. Egy AR ma három munkacsoport jelentésből áll: az első (WG1) a fizikai tudománnyal, a másik kettő pedig a társadalmi hatásokkal és az enyhítési stratégiákkal foglalkozik. A legutóbbi AR az AR6 volt.

ATTRIBÚCIÓ: Oktulajdonítás: ok-okozati összefüggés állítása, mindenekelőtt az antropogén ÜHG-kibocsátás és a megfigyelt éghajlati mintázatok között.

AUTOKORRELÁCIÓ: Az a jelenség, amelyben egy véletlenszerű idősoros változó aktuális értéke korrelál egy korábbi időszakban mért értékkel.

BIOMASSZA: A szerves anyag teljes mennyisége vagy tömege egy adott területen vagy térfogatban.

BRUTTÓ ELSŐDLEGES TERMELÉS: A növények által a fotoszintézis folyamán egy meghatározott időszak alatt felhasznált teljes kémiai energia. A nettó elsődleges termelés a légzéshez szükséges energia felhasználása utáni maradék, és ez jelenti a biomassa növekedéséhez való hozzájárulást.

CMIP (Kapcsolt Modell Összehasonlító Projekt): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület szervezett erőfeszítése számos különféle globális óceán-légkör éghajlati modell olyan módon való összehasonlítására, hogy a kényszer mindegyikben ugyanazon kibocsátási forgatókönyvv (forgatókönyvek) szerint alakul. A két legutóbbi a CMIP5 és a CMIP6 volt (az AR5, illetve az AR6 esetében).

CSÖKKENTÉS (abatement): A környezetpolitika kontextusában: kibocsátás-csökkentés.

DICE (Dinamikus Integrált Éghajlat- és Gazdaságmodell): A William Nordhaus által 1993-ban kidolgozott integrált értékelési modell.

DISZKONTRÁTA: A jövőbeni költségek és hasznok jelenértékre való átváltoztatására használt kamatláb. Fordított arányban változik a jelenértékkel, így a magas diszkontráta csökkenti a jövőbeni költségek és hasznok jelenértékét.

ECS (Egyensúlyi Klímaérzékenység): A légköri CO₂-koncentráció feltételezett megduplázódására adott válaszként a globális átlagos felszíni felmelegedésben bekövetkező hőmérsékletváltozás mértéke az iparosodás előtti szinthez képest.

ELHALÁLOZÁS: A halálesetek száma általában egy adott populációra és időszakra vonatkozóan kifejezve.

EL NIÑO: Az El Niño – Déli Oszcilláció meleg fázisa, amelynek idején a hideg víz a dél-amerikai partvidék mentén gyengébben áramlik fel, és gyengébbek a csendes-óceáni passzátszelek.

ENSO: El Niño – Déli Oszcilláció, egy kiemelkedő jelentőségű természetes éghajlati ingadozás, amely Dél-Amerika egyenlítői partján a hideg víz feláramlásának évenkénti változásait, valamint a Csendes-óceánon átívelő passzátszelek erősödését vagy gyengülését jelenti.

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS: Az éghajlat emberi hatások miatti változása, szemben az éghajlat változékonyságával, ami természetes eredetű

FACE: (Szabad levegőjű CO₂-dúsulás) Nagyléptékű szabadtéri vizsgálatok, amelyekben a növényeket megemelkedett CO₂-szintnek teszik ki, jövőbeli éghajlati forgatókönyveket szimulálva.

FOSSZILIS TÜZELŐANYAG: Természetes eredetű, a geológiai múltban élő szervezetek maradványaiból képződött széntartalmú tüzelőanyag, például szén, olaj vagy földgáz.

FOTOSZINTÉZIS: Az a folyamat, amelyben a növények növekednek, és amelyhez szén-dioxidra, vízre és fényre van szükség kellően meleg hőmérsékleten (10-35 Celsius fok az optimális működéshez).

FUND (Bizonytalanság, Tárgyalás és Eloszlás Keretrendszere): Richard Tol (1997) integrált értékelési modellje.

GBR (Nagy Korallzátony): A világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája Ausztrália északkeleti partjainál.

GDP (bruttó hazai termék): Egy ország határain belül, általában egy év alatt előállított összes végtermék és szolgáltatás piaci értéke.

GHCN (Globális Történeti Klimatológiai Hálózat): Időben változó számú, globális eloszlású meteorológiai állomások sokasága, ahol óránkénti, napi vagy havi csapadék-, hőmérséklet-, és esetenként havazás- és hóvastagság-mérést végeznek.

GLOBALIS ZÖLDÜLÉS: Az 1980-as évek eleje óta a legtöbb növényzettel borított szárazföldi területen műholdakkal megfigyelt zöldfelület-növekedés.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, beleértve az exportot és az importot is, általában egy évre vonatkoztatva.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes belföldön előállított végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, általában egy évre vonatkoztatva.

HURST JELENSÉG: Lásd: hosszú távú perzisztencia.

HIDROLÓGIA: A víz mozgásának tanulmányozása, különösen a szárazföldön és a légkörben.

IAM (Integrált Értékelési Modell): Egy számítógépes eszköz, amely a közgazdaságtant, a klímatudományt és a társadalomtudományokat ötvözi, hogy kvantitatív kapcsolatokat teremtsen az emberi és a földi rendszerek között, segítve a politikai döntések megalapozását.

IEA (Nemzetközi Energiaügynökség): Egy 1974-ben alapított párizsi székhelyű kormányközi szervezet, amely a globális energiaszektorról nyújt politikai ajánlásokat, elemzéseket és adatokat.

IPAROSODÁS ELŐTTI: Az a rövid történelmi időszak, amikor még az emberi üvegházgáz-kibocsátás nem volt jelentősnek tekinthető. Általában az 1700-as évek közepére teszik.

IPCC (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület): Az Egyesült Nemzetek Szervezete és a Meteorológiai Világszervezet által 1988-ban létrehozott nemzetközi szakértőkből és kormányzati képviselőkből álló testület, amelynek célja, hogy a klímapolitika kidolgozásához felhasználható, mindenre kiterjedő tudományos információkkal lássa el a kormányokat.

IR (Infravörös): Hősugárzás, amelyet minden szilárd tárgy és üvegházhatású gáz hőmérsékletének megfelelően bocsát ki.

KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYV: A jövőbeni üvegházgáz-kibocsátás (vagy az ebből eredő légköri koncentráció) feltételezett forgatókönyve, amely a globális gazdasági tevékenységre, a

fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának elterjedtségére és (esetenként) a szárazföld és az óceán CO₂-felvételének mértékére vonatkozó feltételezéseken alapul.

KÓNUSZ: Az Egyesült Államok területileg összefüggő 48 államának együttese.

KÖRNYEZETI (ambient): Ami valaminek a közvetlen környezetére vonatkozik.

KUKORICA: Tengeri.

LA NIÑA: Az ENSO hűvös fázisa, amelynek során a hideg víz erősebben áramlik fel a dél-amerikai partoknál, és erősebbek a csendes-óceáni passzátszelek.

LÚGOS: Aminek a kémiai pH-értéke nagyobb, mint 7,0. A savas „ellentéte”, ami 7,0-nél kisebb pH-értéket jelent.

MODELL: Számítógépes kód vagy kódgyűjtemény, amely számszerűsíti a különböző folyamatokról és azok közötti kölcsönhatásokról alkotott ismereteinket.

NCA (Nemzeti Éghajlat-értékelés): Az 1990-es Globális Változáskutatási Törvény által előírt időszakos jelentés, amely összefoglalja az éghajlatváltozás Egyesült Államokra gyakorolt hatását. Öt NCA-jelentés készült: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18) és NCA5 (2023).

OECD (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet): 38 tagországból álló csoport, amelyek demokratikus kormányzati rendszerrel és szabad gazdasági rendszerrel rendelkeznek.

ÖKONOMETRIA: A közgazdaságtan azon ága, amely a gazdasági rendszerek elemzésével a statisztikai módszerek (főként többszörös regresszió) alkalmazásával foglalkozik.

PALEOKLÍMA: A távoli múlt éghajlata (jellemzően a 1850 előtti időszaké). A modern időjárási eszközök széles körben elterjedése előttről ún. proxy (proxy, „közvetett”) méréseket, például fa-évvégűrűket, jégmagokat virágporokat stb. használnak.

PDI (Teljesítmény Disszipáció Index): A trópusi ciklon időbeli felhalmozódott pusztító potenciáljának statisztikai becslése. A maximális tartós szélsőségek köbének összegzéséeként számítják ki.

PDO: Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció, a Csendes-óceán medencéjének középponti részén ismétlődő óceán-légkör kölcsönhatás, amely túlnyomórészt meleg vagy hideg mintázatokkal jár, és befolyásolja a globális éghajlatot.

PPM: Egymilliomodnyi részecske, egy anyag koncentrációjának mértéke (például) a légkörben.

RCP (Reprezentatív Koncentráció Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházhatású gázok kibocsátására és azok légkörre gyakorolt hatására vonatkozóan. Ezeket az IPCC ötödik értékelő jelentésében (AR5) mutatták be. Az RCP forgatókönyvek számcímkevel (pl. RCP6.0) rendelkeznek, ami azt jelzi, hogy mennyi sugárzási kényszert feltételeznek 2100-ban az iparosodás előtti időkhöz képest, watt/négyzetméterben. Az RCP4.5 és az RCP6.0 köztes forgatókönyvek, míg az RCP8.5 egy szélsőséges forgatókönyv, nagyon nagy jövőbeli üvegházhatású gázkibocsátással.

REGRESSZIÓ: Statisztikai módszer egy lineáris egyenlet együtthatóinak kiválasztására, hogy egy függő változó viselkedését egy vagy több változótól való függés segítségével magyarázzák.

RICARDI ANALÍZIS: A környezetgazdaságtanban használt, David Ricardóról elnevezett módszer az éghajlatváltozás gazdasági hatásainak, különösen a mezőgazdaságra gyakorolt hatás becslésére, azon hipotézis felhasználásával, hogy a jövőbeli mezőgazdasági tevékenységhez való megtérülés várható változásai a jelenlegi földértékekben tőkésülnek.

SAVASODÁS: Általánosan használt kifejezés az óceán pH-értékének lúgosabbról kevésbé lúgos értékekre való csökkenésére.

SCC (a szén társadalmi költsége): Annak a nettó gazdasági kárnak a becslése dollárban, jelenértéken mérve, amit egy tonna CO₂ légkörbe kibocsátási többlete okoz.

SSP (Megosztott Társadalmi-gazdasági Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházgáz-kibocsátásra és azok légkörre gyakorolt hatására. Ezeket az IPCC hatodik értékelő

jelentésében (AR6) mutatták be. Néhány SSP forgatókönyv régebbi RCP forgatókönyveknek felel meg, a folytonosság és a korábbi klímamodell-értékelésekkel való összehasonlítás céljából.

SUGÁRZÁSI VISSZACSATOLÁS: A felszínhőmérséklet megváltozása által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SUGÁRZÁSI KÉNYSZER: Az üvegházhatású gázok, antropogén aeroszolok, vulkánkitörések stb. által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SZÁRAZJÉG: Fagyott szén-dioxid.

SZÉN („karbon“): A periódusos rendszer 6. eleme. Gyakran használják a szén-dioxid rövidítéseként.

TC: Trópusi ciklon.

TMAX: A napi maximális felszíni levegőhőmérséklet.

TMIN: A napi minimális felszíni levegőhőmérséklet.

TOA: A légkör teteje.

TONNA: tonna, azaz 1000 kg.

TOXIKOLÓGIA: Vegyi anyagok élő szervezetekre gyakorolt káros hatásainak vizsgálata.

TREND: Egy általában lineáris regresszióval becsült együttható, ami az adatok idősorához legjobban illeszkedő egyenes meredekségét jelenti, jelezve a sorozat átlagának időbeni felfelé vagy lefelé történő mozgásában bekövetkező tendenciát.

TSI (Teljes Napbesugárzás): A Föld légkörét elérő, egységnyi területre jutó teljes beeső napsugárzás mennyiségének mértéke, beleértve az elektromágneses sugárzás teljes hullámhossz-tartományára kiterjedően. Általában watt/négyzetméterben (W/m²) adják meg.

ÜVEGHÁZHATÁS (GHE): Az a hajlam, hogy bármely, üvegházhatású gázt tartalmazó bolygó légköre a legalacsonyabb rétegekben melegebb, mintha ezen gázok a légkörben nem lennének jelen.

ÜVEGHÁZHATÁSÚ GÁZ (GHG, ÜHG, ÜVEGHÁZGÁZ): Olyan légköri gáz, amely az infravörös sugárzást elnyeli és kibocsátja, ilyen különösen a vízgőz, a CO₂ és a metán.

VESZÉLYEZTETETTSÉGI MEGÁLLAPÍTÁS (EF): A Környezetvédelmi Ügynökség igazgatójának 2009-es megállapítása, miszerint a jól elkevert üvegházhatású gázok (elsősorban a CO₂) kibocsátása veszélyezteti az emberi egészséget és jólétet.

UHI (Városi Hősziget): Az a jelleg, hogy a lakott területek melegebbek, mint vidéki környezetük, ami a természetes földterületek és növényzet utakkal, parkolókkal, épületekkel és hulladékhő-forrásokkal való felváltása miatt következik be.

USHCN: Az Egyesült Államok Történelmi Klimatológiai Hálózata, amely 1218 felszíni meteorológiai állomás minőségellenőrzött hőmérsékleti és csapadékadatait tartalmazza.

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

- 2.1. ábra: Képernyőkép Zhu et al. 2016 3. ábrájából <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>
- 2.2. ábra: Képernyőkép Gerhart és Ward (2010) munkájából 2. ábra:
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- 2.3. ábra: Képernyőkép a Copernicus Marine Services-ből
https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- 2.4. ábra: Képernyőkép az AIMS (2023) munkájából 2-4. ábra https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf
- 3.1.1. ábra: Az AR6 WG1 Ch2 képernyőképe, 10. ábra
- 3.1.2. ábra: Az AR6 WG1 Ch7 képernyőképe, 7-6. ábra
- 3.1.3. ábra: A szerző által készített ábra. CO₂ adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>
- 3.2.1. ábra: Képernyőkép Hausfather et al. (2019) S4. ábra <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- 3.2.2. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: Freidlingstein et al. (2024)
<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519> Adatforrás: <https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 3.2.3. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 3.2.4. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 4.1. ábra: Képernyőkép Scafetta (2021) 1. ábra: <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- 5.1. ábra: Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> Szerző által létrehozott ábra. Modellenként egy együttestag, az éves átlaghőmérséklet a globális havi nyers hőmérsékletekből lett kiszámítva; a „tartomány” az egyes évek legmelegebb modellhőmérséklete és a leghidegebb modellhőmérséklet különbsége; A szórás mind a 33 modell nyers hőmérsékletein kiszámítva minden évben.
- 5.2. ábra: Scafetta (2023) képernyőképe 2. ábra <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- 5.3. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Modellenként egy SSP370 együttes tag. Lineáris OLS trendek a globális havi hőmérsékleti anomáliákból számítva 1981-2010-hez viszonyítva.
- 5.4. ábra: A szerző által készített ábra, McKittrick és Christy (2020) 3. ábrája alapján
<https://doi.org/10.1029/2020EA001281>. Frissítve ugyanazokkal a módszerekkel és 2014-től 2024-ig kiterjesztett adatokkal, lásd McKittrick és Christy (2025) a fejezethivatkozásokban.
- 5.5. ábra: Az IPCC AR5 képernyőképe. 10.SM1 ábra, szerzői megjegyzésekkel
- 5.6. ábra: A szerző Christy és McNider (2017) <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z> nyomán készítette az ábrát, a frissített adatok a https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/ERA5_REANALYSES/ és https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/JRA3Q_REANALYSES/ oldalon érhetők el, itt összeállítva:
https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/CWG25_Fig_5.7_Table_250627.xlsx
- 5.7. ábra: Képernyőkép a https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 oldalról (hozzáférés: 2017. május 27.) 2025)
- 5.8. ábra: Rugenstein és Hakuba (2023) képernyőképe 1. ábra <https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

5.9. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. OLS lineáris trendek. Modellenként egy SSP370 együttes tag, átlagolt felszíni levegőhőmérsékletek júniustól augusztusig a 31N és 49N szélességi fok, 84W és 102W hosszúsági fok között. A NOAA/NCEI ugyanezen hónapokra vonatkozó megfigyelt hőmérsékleti adatai a <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/time-series> oldalon a 12 kukoricaövi államra vonatkozóan, átlagolva.

6.1.1. ábra Koutsoyiannis (2013) 10. ábrájának szerzői másolata
<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>

6.2.1. ábra Maue (2025) ábrájának képernyőképe <https://climatlas.com/tropical/>

6.2.2. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a Nemzeti Hurrikánközpontból (2024)
<https://www.nhc.noaa.gov/climo/>

6.2.3. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a NOAA Hurrikánközpontból
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

6.2.1. táblázat A szerző által létrehozott táblázat. NOAA HRD adatok
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html

6.3.1. ábra: Képernyőkép az NCA4-ből

6.3.2. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.3. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.4. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.5. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.6. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.7. ábra Képernyőkép a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> oldalról

Dobozos táblázatok. Szerző által létrehozott táblázat. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.1. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.2. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.3. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.4. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.5. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.5.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

6.7.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0>, hozzáférés: 2025. június 16. OLS trendvonal hozzáadva.

6.8.1. ábra: Lizundia-Loiola et al. (2021) képernyőképe. 12. ábra.

6.8.2. ábra: Marlon et al. (2012) képernyőképe. 2. ábra, C panel.
<https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>

6.8.3. ábra: A szerző által készített ábra. 1926-tól 2016-ig terjedő adatok:
https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html. 2017
utáni adatok: <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires> Hozzáférés: 2025. június 16.

7.1. ábra: Képernyőkép a <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/> oldalról

7.1. táblázat: A szerző által létrehozott táblázat. A 6.2. szakaszból a <https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2018/11/special-report-sea-level-rise-3.pdf>

7.2. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290
(letöltve: 2025.04.22.)

7.3. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450
(letöltve: 2025.04.22.)

7.4. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724
(letöltve: 2025.04.22.)

7.5. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750
(letöltve: 2025.04.22.)

7.6. ábra: A szerző által készített ábra. Adatok innen:
https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750

8.1. ábra Képernyőkép innen: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

8.2. ábra Képernyőkép Hansen és Karecha (2025) munkájából 1. ábra
<https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>

8.1. táblázat Képernyőkép a 12.12. táblázat 1. oszlopáról, IPCC AR6 Munkacsoport I. jelentése

9.1. ábra Képernyőkép Taylor és Schlenker (2021) munkájából 1. ábra, <https://www.nber.org/papers/w29320>

9.2. ábra Képernyőkép McKittrick (2025) munkájából 1. ábra, <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>

10.1. ábra: Képernyőkép Pielke (2024) munkájából <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0> 3.
ábra: 10.2. ábra: Képernyőkép Gasparini et al. munkájából (2015) 2. ábra, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)

11.1. ábra: Képernyőkép Pielke Jr.-tól (2023). <https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>

11.2. ábra: Képernyőkép CEA-OMB-től (2023) <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf> 1. ábra.

A SZERZŐKRŐL

John Christy PhD a Huntsville-i Alabamai Egyetem Léggör- és Földtudományok Tanszékének kitüntetett professzora, valamint Alabama állam klimatológusa. Matematika szakon szerzett BA diplomát a Fresno-i California State University-n, MSc-t és PhD-t a champaigni Illinois-i Egyetemen. Az Amerikai Meteorológiai Társaság tagja, és a NASA Kivételes Tudományos Teljesítményért járó Érem kitüntetésének birtokosa, ugyanis Dr. Roy Spencerrel együtt poláris pályán keringő műholdakról ők állították elő az első globális léggöri hőmérsékleti adatsort. Ő volt a 3. IPCC Értékelő Jelentés (AR3, 2001) vezető szerzője: Társszerzője volt az amerikai NAS (Nemzeti Tudományos Akadémia) felszínhőmérséklet-rekonstrukciókról szóló szakértői jelentésének (2006), és tagja volt a NOAA Klímaváltozás Tudományos Programjának, a NASA Földtudományi Albizottságának, az amerikai Nemzeti Kutatási Tanács Űrkutatási Testületének és az USA Környezetvédelmi Hatóság (EPA) Tudományos Tanácsadó Testületének. Mindemellett Dr. Christy 20 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Judith Curry PhD a Georgia Institute of Technology nyugalmazott professzora, ahol 13 évig a Föld- és Léggörtudományi Tanszék vezetője volt. A Climate Forecast Applications Network (CFAN) elnöke és társalapítója. Geofizikából doktorált a Chicagói Egyetemen. 192 lektorált publikáció szerzője vagy társszerzője a léggör- és éghajlattudományok területén. Két tankönyv, valamint legutóbb a *Climate Uncertainty and Risk* című könyv szerzője. Curry tagja az Amerikai Meteorológiai Társaságnak, az Amerikai Tudományfejlesztési Társaságnak, az Amerikai Geofizikai Uniónak, valamint az Amerikai Tudományos és Irodalmi Akadémiának. Tagja volt a Globális Éghajlatkutatási Program számos tudományos irányító bizottságában, valamint az Energiaügyi Minisztérium Biológiai és Környezeti Kutatási Tanácsadó Bizottságában, a NASA Tanácsadó Testületének Földtudományi Albizottságában, valamint az NRC Űrkutatási Tanácsában és az Éghajlatkutatási Bizottságban. Dr. Curry 13 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Honored (Nagytiszteletű) **Steven E. Koonin PhD** a Stanford Hoover Intézetében a „Teller Ede vezető munkatárs” cím birtokosa. Tudományügyi helyettes államtitkár volt az Energiaügyi Minisztériumban (2009-2011), vezető kutató a British Petroleumnél (2004-2009), valamint professzor a Caltech-en (1975-2004, ebből az elmúlt kilenc évben alelnök és igazgató). Koonin tagja a Nemzeti Tudományos Akadémiának és a JASON kormányzati tanácsadó csoportnak. A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium kormányzója, hasonló tisztségeket töltött be a Los Alamos, a Sandia, a Brookhaven és az Argonne nemzeti laboratóriumokban. Korábban egyetemi professzorként dolgozott a New York-i Egyetemen, nem rezidens vezető munkatársként az American Enterprise Institute-ban, valamint a Védelmi Elemzések Intézetének kuratóriumi tagjaként. Koonin fizika szakon szerzett BSc diplomát a Caltech-en, elméleti fizikából pedig PhD fokozatot a Massachusetts Institute of Technology-n. Ő a 2021-es bestseller, az *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, az 1985-ös *Computational Physics* című tankönyv, valamint a fizika, az asztrofizika, a tudományos számítás, az energiatechnológia és -politika, valamint a klímatudomány területén mintegy 200 lektorált cikk szerzője. (Az *Unsettled*-et *Tisztázatlan: Amit az éghajlattudomány mond, amit nem mond, és mindez miért fontos* címmel 2023-ban magyarul is megjelent.)

Ross McKittrick PhD a kanadai Ontario állambeli Guelph Egyetem környezetgazdaságtan professzora. Közgazdaságtanból BA diplomát a Queen's Egyetemen, MA és PhD fokozatot pedig a British Columbia Egyetemen szerzett. Éghajlatváltozással, szennyezéssel és közpolitikával kapcsolatos témákban széleskörű publikációs tevékenységet fejtett ki mind közgazdaságtudományi, mind fizikai folyóiratokban. Könyvét, a *Economic Analysis of Environmental Policy*-t, a University of Toronto Press adta ki 2010-ben. Az alkalmazott statisztikában szerzett ismeretei arra késztették, hogy lektorált cikkek szerzője, illetve társszerzője legyen a fizikai tudományok széles skáláján, beleértve a

paleoéghajlat rekonstrukcióját, a malária terjedését, a felszínhőmérséklet mérését, az éghajlati attribúció (oktuldajdonítás) módszertanát és az éghajlati modell értékelését. McKitrick professzor világszerte számos meghívásos tudományos előadást tartott. Meghívott közreműködő volt a Nemzeti Tudományos Akadémia 2006-os felszínhőmérséklet-rekonstrukcióról szóló jelentésében, szaklektorként szolgált a három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben (I. és II. munkacsoport), és tanúvallomásokat tett az Egyesült Államok Kongresszusa, valamint a kanadai alsóház és szenátus bizottságai előtt.

Roy W. Spencer PhD vezető kutató az Alabamai Egyetemen, Huntsville-ben. Légkör- és Óceántudományi BSc diplomát a Michigani Egyetemen szerzett, MSc és PhD fokozatát meteorológiából a Wisconsin-Madison Egyetemen kapta. Spencer tudományos publikációi az időjárási folyamatok és az éghajlatváltozás Föld körül keringő műholdakról történő megfigyelésére, valamint az éghajlati érzékenység és az éghajlati visszacsatolások diagnosztizálására szolgáló egyszerű fizikai modellek használatára összpontosítottak. A NASA klímakutatásokért felelős vezető kuitatójaként az Aqua műhold ún. Fejlett Mikrohullámú Pásztázó Radiométer (AMSR-E) amerikai tudományos csoport vezetőjeként szolgált. Ez a tengerfelszín-hőmérsékletéről, a tengeri jégről és az éghajlati rendszer számos egyéb jellemzőjéről a lehető legpontosabb globális mérési eredményeket szolgáltatatta. Dr. John Christyvel együtt Spencer fejlesztette ki az első műholdas technikát a globális hőmérséklet-megfigyelésre, amiért megkapták a NASA Kivételes Tudományos Teljesítmény Érmét és az Amerikai Meteorológiai Társaság különdíját.

Fordítás:

Szarka László Csaba, a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoport elnöke,

Kocsis Ferenc, Király József, ...

2025. augusztus 14.

Lektorálás: folyamatban (Kiss Ádám, Bársony István, ...)

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Thursday, August 14, 2025 4:21 AM
To: Judith Curry; John Christy
Cc: Steve Koonin; Ross McKittrick
Subject: RE: tornadoes

This revised tornado section is good.
-Roy

Sent from my Verizon, Samsung Galaxy smartphone

----- Original message -----

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Date: 8/13/25 4:57 PM (GMT-06:00)
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Steve Koonin <steven.koonin@gmail.com>, Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>, Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: tornadoes

I am in discussion with Tim Palmer on the climate sensitivity issue

I also added a paragraph to tornado section, based on feedback from the tropical listserv

Apart from the trends in total US tornadoes, the spatial distribution of US tornadoes shows significant variability. In recent decades, the U.S. has seen a broad shift in tornadoes to the east and to occur earlier in the year (Graber et al., 2024). Tippet et al. (2016) found that more tornadoes are clustered into larger outbreaks, although they assessed that this trend did not appear to be associated from human caused climate change. Winter tornadoes have become more frequent over the eastern U.S., notably in the southeast and Midwest (particularly Kentucky, Illinois and Indiana). There has been a steady decline in tornadoes in the traditional spring and summer tornado season and across the Great Plains (Graber et al. 2024) especially across the Great Plains. These findings highlight the need to better understand the role of internal climate variability and anthropogenic forcing in modulating tornado activity.

Graber, M., Trapp, R.J. & Wang, Z. The regionality and seasonality of tornado trends in the United States. *npj Clim Atmos Sci* **7**, 144 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00698-y>

Tippet, MK, C. LePore, and JE Cohen (2016) More tornadoes in the most extreme tornado outbreaks. *Science Reports*, 354 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah7393>

On Wed, Aug 13, 2025 at 2:18 PM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:
Excellent Judy. Were many of the newly included studies cited in the IPCC?

I'm having conversations with the Dessler group ... being completely helpful with data and methods used in Chapter 6.

John C.

On Wed, Aug 13, 2025 at 3:13 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

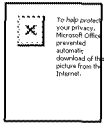
See attached revisions to the hurricane section. I think this strengthens the text without diluting our main points. I look forward to your feedback/comments.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 13, 2025 5:57 PM
To: John Christy
Cc: Steve Koonin; Ross McKittrick; Roy Spencer
Subject: tornadoes

I am in discussion with Tim Palmer on the climate sensitivity issue

I also added a paragraph to tornado section, based on feedback from the tropical listserv

Apart from the trends in total US tornadoes, the spatial distribution of US tornadoes shows significant variability. In recent decades, the U.S. has seen a broad shift in tornadoes to the east and to occur earlier in the year (Graber et al., 2024). Tippet et al. (2016) found that more tornadoes are clustered into larger outbreaks, although they assessed that this trend did not appear to be associated from human caused climate change. Winter tornadoes have become more frequent over the eastern U.S., notably in the southeast and Midwest (particularly Kentucky, Illinois and Indiana). There has been a steady decline in tornadoes in the traditional spring and summer tornado season and across the Great Plains (Graber et al. 2024) especially across the Great Plains. These findings highlight the need to better understand the role of internal climate variability and anthropogenic forcing in modulating tornado activity.

Graber, M., Trapp, R.J. & Wang, Z. The regionality and seasonality of tornado trends in the United States. *npj Clim Atmos Sci* **7**, 144 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00698-y>

Tippet, MK, C. LePore, and JE Cohen (2016) More tornadoes in the most extreme tornado outbreaks. *Science Reports*, 354 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah7393>

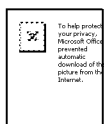
On Wed, Aug 13, 2025 at 2:18 PM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:
Excellent Judy. Were many of the newly included studies cited in the IPCC?

I'm having conversations with the Dessler group ... being completely helpful with data and methods used in Chapter 6.

John C.

On Wed, Aug 13, 2025 at 3:13 PM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:
See attached revisions to the hurricane section. I think this strengthens the text without diluting our main points. I look forward to your feedback/comments.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 10:08 PM
To: Judith Curry
Cc: Steven Koonin; Ross McKittrick; Roy W. Spencer; Josh Loucks; Andrea Woods; Jeremy T. Ison
Subject: Re: nature query

I'm on board.

John C.

Sent from my iPhone

On Aug 6, 2025, at 7:49 PM, Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

works for me

On Wed, Aug 6, 2025 at 3:24 PM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

[adding Andrea and Jeremy to the cc list]

I'm happy to take the lead and respond on behalf of all authors.

Here's the response Andrea had prepared:

“The authors of this report are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate policy and understand that scientific criticism and rebuttal is essential to this process. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments to the docket rather than filtering concerns through non-expert media. The National Climate Working Group looks forward to reviewing and responding to all substantive comments.”

I'd modify it as follows:

We authors are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate science and know that scientific criticism and rebuttal are essential to that process. But productive scientific disagreement must be centered on specifics, not the generalities you have offered. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments on the report to the docket rather than filtering their concerns through media. We look forward to reviewing and responding seriously to all serious scientific comments.

Your thoughts?

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:59 PM
To: Ross McKittrick <ross.mckitrick@gmail.com>
Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Josh Loucks <loucksj14@gmail.com>
Subject: Re: nature query

Sounds good to me.

John C.

On Wed, Aug 6, 2025 at 4:56 PM Ross McKittrick <ross.mckitrick@gmail.com> wrote:

This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

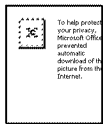
One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 8:49 PM
To: Steven Koonin
Cc: John Christy; Ross McKittrick; Roy W. Spencer; Josh Loucks; Woods, Andrea; Ison, Jeremy T.
Subject: Re: nature query

works for me

On Wed, Aug 6, 2025 at 3:24 PM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

[adding Andrea and Jeremy to the cc list]

I'm happy to take the lead and respond on behalf of all authors.

Here's the response Andrea had prepared:

“The authors of this report are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate policy and understand that scientific criticism and rebuttal is essential to this process. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments to the docket rather than filtering concerns through non-expert media. The National Climate Working Group looks forward to reviewing and responding to all substantive comments.”

I'd modify it as follows:

We authors are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate science and know that scientific criticism and rebuttal are essential to that process. But productive scientific disagreement must be centered on specifics, not the generalities you have offered. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments on the report to the docket rather than filtering their concerns through media. We look forward to reviewing and responding seriously to all serious scientific comments.

Your thoughts?

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>

Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:59 PM

To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>

Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Josh Loucks <loucksj14@gmail.com>

Subject: Re: nature query

Sounds good to me.

John C.

On Wed, Aug 6, 2025 at 4:56 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 6:45 PM
To: Steven Koonin
Cc: John Christy; Judith Curry; Roy W. Spencer; Josh Loucks; Woods, Andrea; Ison, Jeremy T.
Subject: Re: nature query

Excellent. I would just change the last sentence to " We look forward to reviewing and responding carefully to all serious scientific comments."
(avoids duplicating "seriously")

On Wed, Aug 6, 2025 at 6:24 PM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

[adding Andrea and Jeremy to the cc list]

I'm happy to take the lead and respond on behalf of all authors.

Here's the response Andrea had prepared:

“The authors of this report are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate policy and understand that scientific criticism and rebuttal is essential to this process. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments to the docket rather than filtering concerns through non-expert media. The National Climate Working Group looks forward to reviewing and responding to all substantive comments.”

I'd modify it as follows:

We authors are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate science and know that scientific criticism and rebuttal are essential to that process. But productive scientific disagreement must be centered on specifics, not the generalities you have offered. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments on the report to the docket rather than filtering their concerns through media. We look forward to reviewing and responding seriously to all serious scientific comments.

Your thoughts?

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>

Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:59 PM

To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>

Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Josh Loucks <loucksj14@gmail.com>

Subject: Re: nature query

Sounds good to me.

John C.

On Wed, Aug 6, 2025 at 4:56 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 6:24 PM
To: 'John Christy'; 'Ross McKittrick'; 'Judith Curry'; 'Roy W. Spencer'
Cc: 'Josh Loucks'; 'Woods, Andrea'; 'Ison, Jeremy T.'
Subject: RE: nature query

Importance: High

[adding Andrea and Jeremy to the cc list]

I'm happy to take the lead and respond on behalf of all authors.

Here's the response Andrea had prepared:

"The authors of this report are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate policy and understand that scientific criticism and rebuttal is essential to this process. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments to the docket rather than filtering concerns through non-expert media. The National Climate Working Group looks forward to reviewing and responding to all substantive comments."

I'd modify it as follows:

We authors are committed to a transparent and fact-based dialogue on climate science and know that scientific criticism and rebuttal are essential to that process. But productive scientific disagreement must be centered on specifics, not the generalities you have offered. The Department of Energy has opened a public comment period, and we urge the broader scientific community to submit their comments on the report to the docket rather than filtering their concerns through media. We look forward to reviewing and responding seriously to all serious scientific comments.

Your thoughts?

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:59 PM
To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Josh Loucks <loucksj14@gmail.com>
Subject: Re: nature query

Sounds good to me.

John C.

On Wed, Aug 6, 2025 at 4:56 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.

From: John Christy <climateman60@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:59 PM
To: Ross McKittrick
Cc: Judith Curry; Roy W. Spencer; Steven Koonin; Josh Loucks
Subject: Re: nature query

Sounds good to me.

John C.

On Wed, Aug 6, 2025 at 4:56 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:
This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.

From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 5:56 PM
To: Judith Curry; Roy W. Spencer; John Christy; Steven Koonin; Josh Loucks
Subject: nature query

This is the "question" from Jeff Tollefson at Nature magazine

I'm writing a story about the DOE climate report and wanted to get your responses to critiques/allegations from scientists that we cite in our article.

In particular, scientists we spoke to said that the report is designed to "suppress" science, not advance it; that it does not seem to have gone out for proper/standard peer review; that it cherry-picks evidence to fit the authors' and administration's views on climate, which run counter to science; that it ignores evidence that doesn't fit with the authors' and the administration's views; that it overemphasizes and misinterprets legitimate scientific debates without putting them in context; and that it mischaracterizes existing research even when that research is expressly cited in the report.

One scientist also says one of the report's main problems is self-contradictory logic: it criticizes scientists for studying high GHG emission scenarios saying they are unrealistic, even as the Trump administration proposes fossil fuel development policies that could make those high emission scenarios a reality.

I can give you until noon tomorrow to respond, and thank you for your time and consideration.

I figure it is best if we coordinate on a single response rather than each of us weighing in. Maybe Steve could be on point.

I think the usual responses apply here: This is the draft for public comments and expert review; it is being prepared following all standard procedures; we encourage critics to submit comments to the EPA docket; the comments and our responses will be on the public record.

From: Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]
Sent: 8/21/2025 3:52:38 PM
To: 'Judith Curry' [curry.judith@gmail.com]
CC: 'John Christy' [climateman60@gmail.com]; 'Ross McKittrick' [ross.mckittrick@gmail.com]; 'Roy Spencer' [roywspencer@hotmail.com]
Subject: RE: public comments posted
Attachments: image001.jpg

Agreed. Let's wait until COB EDT today.

[Note we'll need to edit your text to reflect I'm not at SGE. Also to add a bullet asking that the lab/DOE review comments and responses be posted ASAP]

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 21, 2025 11:41 AM
To: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Cc: John Christy <climateman60@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: public comments posted

If we don't hear back from him today, suggest we send my email with cc to Audrey

On Thu, Aug 21, 2025 at 8:36 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:
Already sent a much briefer note, but we'll include this list during the scheduling drill - SEK

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 21, 2025 11:34 AM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: public comments posted

Draft dear jonathan letter (cc audrey)

Dear Jonathan,

Based on last week's call, we expected you to arrange another call this week. As a reminder, here are the outstanding issues:

- ? Release all of the public comments on the CWG report (we have spotted 200 that are released)
- ? Curry does not yet have a contract
- ? Koonin, Christy and Spencer's SGE appointments have just ended
- ? We need an update on the lawsuit filed against the DOE and CWG, and whether there are constraints on our public statements
- ? We would like an update on the status of external review committee for the CWG Report

? We would like clarification on the schedule we need to work under for revising the CWG Report and responding to comments

? We would like an update on the status of the NCA5 Review, and whether the charge for that has changed.

Thank you for your attention to these matters

On Thu, Aug 21, 2025 at 8:25 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

Crickets here. My SGE ran out yesterday.

John C.

On Thu, Aug 21, 2025 at 10:14 AM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

Any one have any idea what Jeremy is up to? We were supposed to have a call this week and still no action on my contract

On Thu, Aug 21, 2025 at 7:15 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

I'd hope the DOE staff will do the collating, grouping, ... and response to the non-specifics. They should also flagging the groups of substantial comments for us to respond to.

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>

Sent: Thursday, August 21, 2025 10:13 AM

To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>

Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>

Subject: Re: public comments posted

Is someone collating these comments? The few I checked were either cheer-leaders or antagonists, but neither bunch listed anything specific and actionable.

John C.

On Tue, Aug 19, 2025 at 10:38 AM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

The blog post mostly concedes our arguments but says we should emphasize model projections that things will get worse and also acknowledge that the Philip et al paper discussed many uncertainties. Maybe there's more there, will look later.

On Tue, Aug 19, 2025 at 8:09 AM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

Interesting. I appreciate all this context, but I'm not sure if I would change any of the text we have. I will have to take a closer look

On Tue, Aug 19, 2025 at 8:01 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Two hundred public comments are now visible on the Federal Register site:
<https://www.regulations.gov/document/DOE-HQ-2025-0207-0001/comment>

A random browse through them shows very few have any scientific substance. And I expect those that do will have been handled while responding to the Carbon Brief criticisms.

But here's one that I found interesting: <https://www.regulations.gov/comment/DOE-HQ-2025-0207-0090> , with a longer explanation at <https://woodromances.blogspot.com/2025/08/the-doe-report-case-study-in-scientific.html>

SEK

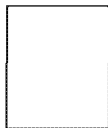
PS Tomorrow, RPjr and I will journey to Austin to tape a 3-way conversation about the report with Scott Tinker for his PBS show, to air in the Spring. I will be very careful to stick to the content, not creating grist for the lawsuits over process.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications
Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com |
+1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications
Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com |
+1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications
Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com |
+1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications
Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com |
+1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 21, 2025 11:41 AM
To: Steven Koonin
Cc: John Christy; Ross McKittrick; Roy Spencer
Subject: Re: public comments posted

If we don't hear back from him today, suggest we send my email with cc to Audrey

On Thu, Aug 21, 2025 at 8:36 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Already sent a much briefer note, but we'll include this list during the scheduling drill - SEK

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 21, 2025 11:34 AM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: public comments posted

Draft dear jonathan letter (cc audrey)

Dear Jonathan,

Based on last week's call, we expected you to arrange another call this week. As a reminder, here are the outstanding issues:

- Release all of the public comments on the CWG report (we have spotted 200 that are released)
- Curry does not yet have a contract
- Koonin, Christy and Spencer's SGE appointments have just ended
- We need an update on the lawsuit filed against the DOE and CWG, and whether there are constraints on our public statements
- We would like an update on the status of external review committee for the CWG Report
- We would like clarification on the schedule we need to work under for revising the CWG Report and responding to comments
- We would like an update on the status of the NCA5 Review, and whether the charge for that has changed.

Thank you for your attention to these matters

On Thu, Aug 21, 2025 at 8:25 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

Crickets here. My SGE ran out yesterday.

John C.

On Thu, Aug 21, 2025 at 10:14 AM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

Any one have any idea what Jeremy is up to? We were supposed to have a call this week and still no action on my contract

On Thu, Aug 21, 2025 at 7:15 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

I'd hope the DOE staff will do the collating, grouping, ... and response to the non-specifics. They should also flagging the groups of substantial comments for us to respond to.

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>

Sent: Thursday, August 21, 2025 10:13 AM

To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>

Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>

Subject: Re: public comments posted

Is someone collating these comments? The few I checked were either cheer-leaders or antagonists, but neither bunch listed anything specific and actionable.

John C.

On Tue, Aug 19, 2025 at 10:38 AM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

The blog post mostly concedes our arguments but says we should emphasize model projections that things will get worse and also acknowledge that the Philip et al paper discussed many uncertainties. Maybe there's more there, will look later.

On Tue, Aug 19, 2025 at 8:09 AM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

Interesting. I appreciate all this context, but i'm not sure if I would change any of the text we have. I will have to take a closer look

On Tue, Aug 19, 2025 at 8:01 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

Two hundred public comments are now visible on the Federal Register site:
<https://www.regulations.gov/document/DOE-HQ-2025-0207-0001/comment>

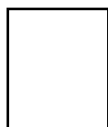
A random browse through them shows very few have any scientific substance. And I expect those that do will have been handled while responding to the Carbon Brief criticisms.

But here's one that I found interesting: <https://www.regulations.gov/comment/DOE-HQ-2025-0207-0090> , with a longer explanation at <https://woodromances.blogspot.com/2025/08/the-doe-report-case-study-in-scientific.html>

SEK

PS Tomorrow, RPjr and I will journey to Austin to tape a 3-way conversation about the report with Scott Tinker for his PBS show, to air in the Spring. I will be very careful to stick to the content, not creating grist for the lawsuits over process.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA

curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

From: Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]
Sent: 8/21/2025 3:36:40 PM
To: 'Judith Curry' [curry.judith@gmail.com]; 'John Christy' [climateman60@gmail.com]
CC: 'Ross McKittrick' [ross.mckittrick@gmail.com]; 'Roy Spencer' [roywspencer@hotmail.com]
Subject: RE: public comments posted
Attachments: image001.jpg

Already sent a much briefer note, but we'll include this list during the scheduling drill - SEK

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Thursday, August 21, 2025 11:34 AM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: public comments posted

Draft dear jonathan letter (cc audrey)

Dear Jonathan,

Based on last week's call, we expected you to arrange another call this week. As a reminder, here are the outstanding issues:

- ? Release all of the public comments on the CWG report (we have spotted 200 that are released)
- ? Curry does not yet have a contract
- ? Koonin, Christy and Spencer's SGE appointments have just ended
- ? We need an update on the lawsuit filed against the DOE and CWG, and whether there are constraints on our public statements
- ? We would like an update on the status of external review committee for the CWG Report
- ? We would like clarification on the schedule we need to work under for revising the CWG Report and responding to comments
- ? We would like an update on the status of the NCA5 Review, and whether the charge for that has changed.

Thank you for your attention to these matters

On Thu, Aug 21, 2025 at 8:25 AM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

Crickets here. My SGE ran out yesterday.

John C.

On Thu, Aug 21, 2025 at 10:14 AM Judith Curry <curry.judith@gmail.com> wrote:

Any one have any idea what Jeremy is up to? We were supposed to have a call this week and still no action on my contract

On Thu, Aug 21, 2025 at 7:15 AM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

I'd hope the DOE staff will do the collating, grouping, ... and response to the non-specifics. They should also flagging the groups of substantial comments for us to respond to.